

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Стовпник Станіслав Миколайович**

**УДК 622.031**

**РОЗВИТОК ОСНОВ РУЙНІВНОГО ДЕФОРМУВАННЯ  
ПРИКОНТУРНИХ ПОРІД СЛАБОМЕТАМОРФІЗОВАНОГО МАСИВУ  
ДІЄЮ ГЕОТЕХНІЧНИХ ЗБУРЕНЬ**

Спеціальність 05.15.09 – Геотехнічна і гірнича механіка

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

**Київ – 2021**

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Трофимчук Олександр Миколайович,**  
Інститут телекомунікацій і глобального  
інформаційного простору  
Національної академії наук України, директор;

доктор технічних наук,  
**Войтенко Юрій Іванович,**  
Український державний геологорозвідувальний  
інститут Міністерства екології та природних  
ресурсів України, головний науковий співробітник  
відділу інноваційних технологій;

доктор технічних наук, професор  
**Петренко Володимир Дмитрович,**  
ДВНЗ "Дніпровський національний університет  
залізничного транспорту" МОН України, професор  
кафедри транспортної інфраструктури.

Захист відбудеться 22 квітня 2021 року о 14-00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.22 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Україна, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, ауд. 511.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Україна, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «19» березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,

В. В. Вапнічна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Явище руйнування розглядається як втрата міцності твердого тіла і оцінюється як наукова проблема, що полягає у вивченні розвитку незворотних процесів. Успішні дослідження попередніх років дозволили узагальнити закономірності крихкого руйнування (А. Гриффіт та ін.) і пластичної течії (Р. Мізес та ін.), однак загальнонаукових теоретичних основ руйнування до сьогодні не створено.

Для реальних природних об'єктів, до яких відносяться і гірські породи, найбільш характерним є комбінований характер руйнування, причому у різноманітних співвідношеннях. Внаслідок сполучення різних форм структурних елементів, невтриманості речовинного складу і варіантності розвитку форм руйнування сучасні дослідження порід у більшості мають емпіричні або ймовірні результати.

В той же час вимогами нормативних документів обмежуються інженерні роботи в масивах глинистих порід, які відносять до складних умов. В практиці підземного будівництва ці умови вимагають створення індивідуальних проектів або застосування спеціальних заходів. Тому розвиток досліджень руйнівних процесів у слабометаморфізованих породах складає актуальну науково–технічну проблему.

Для узагальнення умов розглянуто геологічний масив Павлоградсько–Петропавлівського, Самарського та Новомосковського геопромислових районів, де структура масиву на 85 % складається з порід низького рівня метаморфізму (аргілітів та алевролітів). Цей масив залягає у вигляді потужного шару довжиною 120 км і шириною 15–40 км, який вперше розробляється вуглевидобувними підприємствами Західного Донбасу. В масиві до глибини 900 м виділено продуктивну товщу Самарської свити пластів, яка є розгалуженням покладів Донецького басейну в межах Донецько–Дніпровської западини. Розкриття масиву мережею виробок надає можливість детального вивчення поведінки порід в підземних умовах.

На сьогодні в межах означеного району здійснюється видобуток енергетичного вугілля підприємствами ТОВ «ДТЕК «Павлоградвугілля» щорічно біля 20 млн.т., що складає до 70 % загальноукраїнського обсягу. Тому вирішення техніко–економічної проблеми нестійкого стану об'єктів підземної інфраструктури шахт має актуальність для стратегічного забезпечення економіки України власними енергоносіями.

Зважаючи на те, що нове будівництво шахт пов'язане із великими капітальними вкладеннями і потребує значного часу більш перспективним слід вважати інтенсифікацію вуглевидобутку на діючих підприємствах Павлоградсько–Петропавлівського району, що дозволить в короткостроковій перспективі отримати зростання обсягів вугільної продукції за мінімальних капітальних витрат.

До останнього часу шахти ТОВ «ДТЕК Павлоградвугілля» відпрацьовували запаси на глибинах 120–300 м, де геологічні умови були більш сприятливими,

однак поглиблення гірничих робіт викликало значне посилення проявів гірського тиску, інтенсивні зрушення порід (понад 1 м за рік), незатухаюче деформування оточуючих порід і відповідне погіршення стану шахтної мережі виробок, що стало головним фактором стримування вуглевидобутку.

Таким чином, сформульовано **актуальну науково-технічну проблему:** забезпечення стійкого стану оточуючого масиву в умовах руйнівного деформування слабометаморфізованих порід навколо виробок під впливом гірничих робіт.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано відповідно до науково-технічних програм пріоритетного розвитку науки і техніки Міністерства енергетики та вугільної промисловості України і госпдоговорних тем «КПІ ім.Ігоря Сікорського»: «Розробити і впровадити засоби охорони виробок при здиманні порід на шахтах Західного Донбасу» (№ ДР 0130011776), «Розробити та випробувати способи боротьби із здиманням порід на глибоких шахтах Донбасу» (№ ДР 0191920100) та «Розробка та впровадження рамних замкнених і кільцевих кріплень з оптимізацією технології спорудження гірничих виробок у складних гірничо-геологічних умовах із застосуванням комбайнів вибіркової дії» (№ ДР 0121920200), «Розробити та перевірити технологію комбайнового проведення виробок з кільцевим кріпленням на шахтах Західного Донбасу» (№ держреєстрації 0140021836), «Розробити методику визначення технологічних параметрів спорудження гірничих виробок гор. 390 м та гор. 420 м шахти «Західно-Донбаська 6/42 блок №2» (№ ДР 0120112156), «Розробити спосіб армування приконтурного масиву, що забезпечує обмежене деформування конструкції тимчасового комбінованого кріплення при будівництві Бескідського тунелю» (№ ДР 01/18U000661).

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження закономірностей деформування та руйнування слабометаморфізованих порід у гранично напруженому масиві для розробки заходів по забезпеченню експлуатаційного стану виробок під дією геотехнічних збурень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити **завдання:**

1. Виконати інструментальні дослідження зрушень навколо контурного масиву під час проведення та підтримання виробки.
2. Визначити показники деформування та руйнування типових порід в умовах об'ємного напруженого стану масиву.
3. Аналітично дослідити закономірності утворення та розвитку зон деформування порід навколо виробки.
4. Дослідити розповсюдження зон впливу опорного тиску від лави в масиві та їх взаємодію із зоною зруйнованих порід навколо виробки.
5. Розробити технічні способи та заходи для забезпечення паспортного стану виробки.
6. Провести промислову перевірку ефективності технічних рішень по охороні виробок.
7. Виконати техніко-економічну оцінку ефективності заходів.

*Об'єкт дослідження* – геомеханічні процеси у слабометаморфізованому масиві під дією геотехнічних збурень.

*Предмет дослідження* – руйнівне деформування приконтурних порід навколо виробки.

**Методи дослідження.** Як методична основа для вирішення поставлених задач застосована комплексна методика досліджень, яка включає техніко–економічний аналіз показників підтримання мережі гірничих виробок, аналіз сучасного рівня досягнень по управлінню гірським масивом, інструментальні спостереження за деформуванням порід, лабораторні іспити фізико–механічних властивостей порід за умовами надійності і достовірності отриманих результатів, математичних методів кореляції з теорії багатофакторного аналізу, математичне моделювання розподілу гравітаційних напружень в масиві, аналітичні дослідження напружено–деформованого стану порід навколо зони непружних деформацій, як сумісного вирішення системи диференціальних рівнянь рівноваги анізотропного масиву, дослідження контактної взаємодії блоків в зоні зруйнованих порід, метод дослідно–експериментальних випробувань в натурних умовах.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наукових положеннях, в яких вперше:

- визначено, що під час перевищення межового напруженого стану ( $\gamma H > R^*$ ) утворення виробки у слабометаморфізованому масиві викликає інтенсифікацію енерговиділення потенційної енергії оточуючого масиву на глибину 0,7 – 0,9 діаметра виробки як прискорення розвантаження породних відслонень і реалізується у вигляді збільшення радіальної конвергенції порід: за швидкістю у 2,7 – 4,4 рази та початковим періодом у 1,5 – 2,8 рази;

- обґрунтовано, що внаслідок структурно–механічних особливостей слабометаморфізованих порід (тонкошаруватість складання, зменшене міжшарове зчеплення і низька об'ємна міцність) інтенсивність розшарування порід покрівлі має як за глибиною, так і у часі, експоненційно затухаючий розподіл і у діапазоні 0,8 – 3,6 м/добу викликає розвиток руйнування бічних порід з поділом їх магістральними тріщинами на окремі блоки різної форми залежно від швидкості розшарування порід покрівлі;

- запропоновано модель асимптотичного розвитку руйнування навколо виробки у вигляді затухаючого коливального перерозподілу нормальних напружень стискання та дотичних напружень розтягування в масиві, причому в умовах слабометаморфізованих порід зворотний взаємозв'язок руйнування бічних порід та наступної інтенсифікації розшарування порід покрівлі визначається додатковим збільшенням прольоту відслонення порід покрівлі після поширення руйнування бічних порід;

- доведено, що врівноважений стан оточуючого масиву в процесі руйнівного деформування слабометаморфізованих порід навколо виробки досягається на основі єдиного механічного процесу осадження зруйнованих порід та їх послідовного витиснення у порожнину виробки за умови досягнення зоною зруйнованих порід форми несиметричного еліпсу, яка відповідає

еквівалентному співвідношенню квадратів головних осей еліпсу руйнування до показника міцнісної анізотропії порід;

- встановлено, що за умови  $\frac{\gamma H}{R^*} > 0,75$  в межах одного літологічного шару слабометаморфізованих порід перевищення показника порізаності виробками більше 0,2 викликає утворення спільної зони підвищеного гірського тиску за рахунок об'єднання зон зруйнованих порід навколо кожної виробки, яка має здатність радіального поширення в межах шару порід з додатковою інтенсифікацією під впливом проведення наближених виробок, оконтурювання ділянки масиву видобувними роботами та виконанням ремонтних робіт з вийманням зруйнованих порід;

- встановлено, що коефіцієнт послаблення міцності слабометаморфізованих порід, відслонених в шахтних умовах, пов'язаний з параметром  $\gamma H/R^*$  зворотно–степенною залежністю;

- обґрунтовано для умов масиву слабометаморфізованих порід параметри режиму роботи комбінованої конструкції кріплення, які, на відміну від ініціації розшарування порід у піддатливих конструкціях, в діапазоні розпушення обвалених порід 1,05 – 1,33 створюють демпфуючу здатність цього шару у вигляді функції степеневого поліному в системі «масив – навколоконтурний шар зруйнованих порід – кріплення», де згасання інтенсивності навантажень від розшарування порід покрівлі додатково компенсується ущільненням і відновленням носійної спроможності порід;

- визначено взаємозв'язок моменту спорудження кільцевої конструкції кріплення з інтенсивністю конвергенції оточуючих порід як тривалості відслонення породного контуру під час поетапного розкриття перерізу виробки, що забезпечує достатню реалізацію надлишкових напружень понад межевого рівня для слабометаморфізованого масиву, виконанням замкнутої конструкції кріплення після 1,8...3,3 – кратного зменшення інтенсивності радіальної конвергенції порід від початкового гірського тиску.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено та промислово випробувано систему кріплення «рамна кільцева двотаврова конструкція – шар армованих порід – масив», яка забезпечує рівновагу масиву слабометаморфізованих порід у режимі пружного підпору;

- розроблено технологію поетапного спорудження виробок на основі залежності інтенсивності деформаційного процесу навколо виробки на момент створення замкнутої конструкції кріплення.

- запроваджено виробничий процес підтримання магістральних виробок на шахті «Західно–Донбаська» ТОВ «ДТЕК Павлоградвугілля» поетапним замиканням конструкції кільцевого кріплення;

- розроблено галузевий нормативний документ «Руководство по охране горных выработок на шахтах Западного Донбасса» (ВНИМИ);

- запроваджена комбінована кільцева конструкція двотаврового кріплення та анкерного посилення на будівництві Бескідського тунелю.

**Особистий внесок здобувача.** Усі винесені на захист результати дисертації, що узагальнили результати досліджень і наведені у списку публікацій здобувача,

отримані особисто. Серед них: [1] – форми руйнування гірських порід, [2, 29] – розроблена методика і виконані натурні дослідження, [3, 9, 10, 22, 23, 32, 34] – запропанована конструкція кріплення, [4, 31] – запропанована технологія розкриття перерізу по частинах, [5, 12, 24, 33] – розроблена методика і проведені денанометричні дослідження, [6, 7] – виконання і аналіз натурних досліджень, [8] – розробка методики моделювання, [11, 13, 14] – обґрунтовані засоби забезпечення стійкості, [15, 24, 27, 29] – виконані техніко–економічні розрахунки і проаналізовані їх результати, [16–19] – постановка задачі, проведення аналізу і узагальнення результатів, [20, 21] – генерація і обґрунтування наукової ідеї, [26, 28] – розробка системи управління стійкістю гірничих виробок.

**Апробація результатів дослідження.** Основні положення дисертації доповідались на міжнародних, відомчих і науково–технічних конференціях: Міжнародній науково–практичній конференції «*Енергетика. Екологія. Людина*» (м. Київ, Україна, 2016 р.); Науково–практичній конференції «*Школа підземної розробки*» (м. Бердянськ, Україна, 2016, 2017, 2018 р.); International scientific conference “*Present and future of the mining and geological survey*” (Low Tatry, Slovak, 2016); Materiały “*Gornicze Forum Ekonomiczne*” (Krakow, Poland, 2016); Міжнародній конференції «*Перспективи розвитку будівельних технологій*» (м. Дніпро, Україна, 2018 р.); Науково–практичній конференції «*Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів*» (м. Житомир, Україна, 2018 р.); Міжнародній науково–практичній конференції «*Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики*» (м. Київ, Україна, 2019 р.).

**Публікації.** Головні положення дисертаційної роботи викладені у 34 наукових працях, у тому числі 1 монографія, 13 статей у наукових фахових виданнях України, 5 статей у виданнях іноземних держав, які включені до міжнародних наукометричних баз, 3 патенти на винахід, 1 патент на корисну модель, 11 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 152 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 323 сторінки, з яких основний зміст викладено на 289 сторінках, містить 118 рисунків, 18 таблиць та формули.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначена актуальність напрямку досліджень, сформульовано мету, предмет та об'єкт досліджень, поставлені задачі досліджень, викладено їх отримані наукові результати та практичну значимість.

У **першому розділі** наведено аналіз сучасного стану досліджень механіки руйнування, закономірностей поведінки гірського масиву, що ґрунтуються на дослідженнях геомеханічних процесів в умовах порушення його рівноваги впливом гірничих робіт.

Дослідження деформування та руйнування порід навколо виробок виконані широким колом вчених у різноманітних умовах. Визначні досягнення в механіку

підземних споруд внесли І.В. Баклашов, О.О. Борисов, В.І. Борщ–Компонец, А.Ф. Булат, М.С. Буличов, О.С. Бурчаков, Ф.М. Воскобоев, В.В. Виноградов, М.М. Гелескул, В.Т. Глушко, О.М. Динник, В.П. Друцко, Й.С. Єржанов, М.П. Зборщик, Ю.З. Заславський, О.М. Зорин, Г.М. Кузнецов, Г.О. Катков, К.В. Кошелев, В.О. Картозія, Г.О. Ліберман, Г.Г. Литвинський, О.П. Максимов, Л.Я. Парчевський, Г.С. Піньковський, М.М. Протодьяконов, К.В. Рупенейт, О.М. Роєнко, К.С. Сажин, М.О. Ставрогин, К.Ф. Сапицький, Г.О. Симанович, Б.М. Усаченко, Н.М. Фотієва, І.Л. Черняк, Є.І. Шемякін, О.М. Шашенко, А. Лабасс, О. Якобі та ін. Результати цих досліджень дозволили класифікувати прояви гірського тиску, розробити гіпотези поведінки порід і прогнозувати умови підтримання виробок. Серед них слід виділити гіпотези рівноваги склепіння (А. Шульц, А. Гейм, Д. Талобр, В. Риттер, Ф. Енгессер, В. Тромпетер, О. Коммерель та ін.), гіпотези руйнування породної балки (А. Шульц, Н. Фейоль, Г. Манцель та ін.), гіпотези напружено–деформованного стану порід навколо виробки (А. Леон, Ф. Левинсон, Дж. Спелдинг, Р. Феннер, В.Д. Слесарев, С.Г. Авершин, Р. Квапил, Н. Хаст, О.В. Савостьянов та ін.), гіпотеза термодинамічного стану масиву (В.Ф. Лавриненко, О.Є. Хоменко та ін.). Однак слід відзначити, що наведені гіпотези не мають універсального характеру, більшість розроблена для конкретних умов на основі емпіричних залежностей.

Для проявів гірського тиску розроблені спеціальні гіпотези: склепіння тиску (В. Хаак, Ф. Шпрут, Г. Жил–Литцер та ін.), консольної плити (І. Шпарре, А. Шульц, Ф.А. Беласенко, К. Кегль, О.О. Борисов та ін.), попереднього руйнування покрівлі А. Лабасса, ступінчатого опускання П.М. Цимбаревича, радіальних зсувів К.В. Руппенейта, хвилі тиску Г. Вебера, Г. Шпаккелера та ін.

Дослідження цих авторів підтвердили складний багатофакторний характер розвитку гірського тиску, а відсутність узагальнюючих аналітичних залежностей визначило напрямок проведення пошуків для кожного сполучення гірничо–геологічних умов та технологічних факторів.

Специфічні геологічні умови родовищ Західного Донбасу (низька міцність порід, значне зволоження, інтенсивна тріщинуватість та ін.) обумовили складні технічні умови розробки пластів. Для вирішення науково–технічних задач було досліджено широкий ряд питань М.Т. Гришко, І.Е. Головчанським, М.О. Вигодіним, В.В. Виноградовим, В.В. Евтушенко, В.Я. Кириченко, О.В. Колоколовим, О.П. Круковським, О.П. Максимовим, В.С. Мартюшевим, Я.Я. Парчевським, Г.С. Піньковським, А.В. Смирновим, Б.М. Усаченко, Ю.М. Халімендиком, О.М. Шашенко, А.В. Шмиголем, В.І. Шумейко та ін. Результати цих досліджень забезпечили інтенсивний розвиток розробки родовищ Західного Донбасу, але посилення проявів гірського тиску на більших глибинах розробки, поширення нестійкого стану масиву навколо виробок, неспроможність задіяних технічних рішень забезпечити ефективність виробничих процесів призвело до зростання обсягів виробок, що не відповідають паспортному станові (до 12 %), збільшенню обсягів ремонтних робіт з підтримання виробок (у 2–3 рази), додаткових втрат від незадовільного стану мережі гірничих виробок. Ці чинники обумовлюють уповільнення темпів підготовчих



робіт, неочікуваних втрат видобутку, додаткових витрат на транспортування гірської маси, погіршення вентиляційного режиму і, як наслідок, зростання собівартості продукції складає до 20 %.

Для визначення об'єкту досліджень проаналізовано показники шахт ТОВ «ДТЕК Павлоградвугілля», де 85 % мережі підземних виробок складають практично горизонтальні (ухил 3–5°) магістральні та ділянкові штреки з строком служби до 35 та 5 років відповідно, квершлагги – 10 % (до 40 років), стволи та біляствольні – до 5 % (75 років).

Спільна доля ремонтних робіт на шахтах ім. Героїв космосу (1975 р.) та Західно–Донбаській (1979 р.) перевищує 60 % від обсягів робіт по підтриманню виробок ТОВ «ДТЕК Павлоградвугілля». Тому саме ці шахти обрані як базові для проведення детальних досліджень.

З іншої сторони, ці два підприємства виконують гірничі роботи на глибинах, що перевищують 400 м, інші – до 300 м, хоча у майбутньому усі шахти наблизяться або перевищать цей рубіж. Відповідно умови підтримання виробок на цих підприємствах будуть типовими для роботи інших шахт ТОВ «ДТЕК Павлоградвугілля» у перспективі.

Надалі виконано техніко–економічний аналіз ефективності підтримання виробок на цих шахтах. Встановлено, що тільки втрати від незадовільного стану виробок складають за рік від 2,0 до 2,5 млн у. о. для кожної шахти, що у 1,5–1,8 рази перевищує вартість прямих витрат на підтримання виробок, а загальна сума непродуктивних витрат кожної шахти сягає 3,0–3,9 млн у. о. на рік.

Таким чином, незадовільний стан шахтної мережі виробок суттєво обмежує розвиток гірничих робіт в цих умовах.

У **другому розділі** наведена оцінка фактичного стану гірничих виробок, для яких виконано періодичне фотометричне обстеження виробок, в результаті якого встановлено наступне.

Фотозамірюваннями було охоплено понад 80 % виробок досліджуваних шахт, причому не менше ніж три рази кожна з фотофіксацією змін у стані виробки. За результатами обстежень було визначено, що капітальні виробки знаходяться у задовільному стані, а для їх підтримання достатньо періодичних ремонтних робіт. Ділянкові штреки до впливу лави знаходяться у задовільному стані, а за її підходу достатнім є посилення органним кріпленням і локальне підривання порід. Магістральні штреки вимагають проведення періодичних ремонтних робіт ще на етапі проведення, а після потрапляння в зону впливу видобувних робіт – практичного відновлення.

Узагальненням результатів обстежень було визначено, що нормативні засоби підтримання і охорони не забезпечують експлуатаційну стійкість виробок внаслідок інтенсивного розвитку руйнування порід навколо виробок.

Безпосередні інструментальні спостереження за деформуванням порід були виконані у 8 виробках на обох обраних шахтах шляхом спорудження 36 станцій, з яких 11 – станції глибинних реперів, результати яких наведені далі.

Результати спостережень за переміщеннями контуру порід і кріплення у східному магістральному штреку № 2 гор. 480 м шахти Західно–Донбаська представлені на рис. 1.

Ця виробка проведена в межах шару пісковика міцністю 40 МПа потужністю 8 м, обмеженого потужними шарами аргіліту міцністю 14 МПа.

Переміщення контуру порід в покрівлі стабілізувались через 28 діб у момент вичерпання зазору між масивом і кріпленням, що початково складав 50–70 мм. Швидкість здимання порід від початкових 3 мм/добу зменшилась до 0,3 мм/добу, але стабілізації не відбулося за 700 діб спостережень.

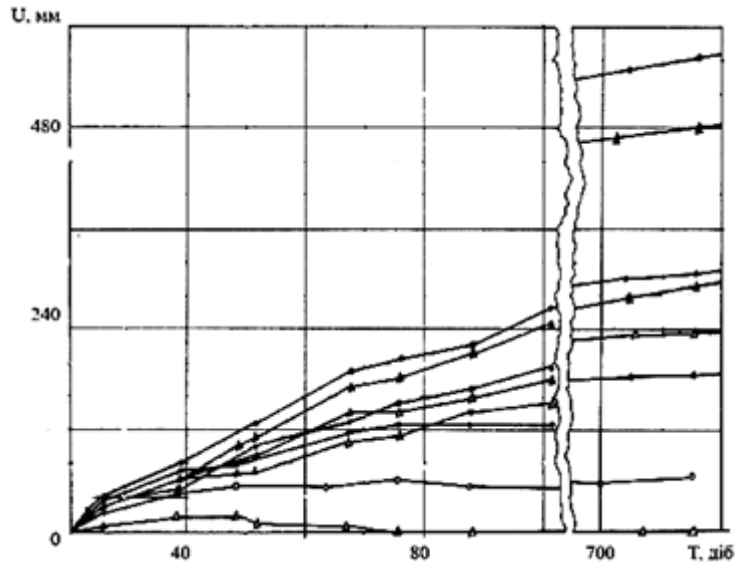


Рисунок 1 – Переміщення контуру порід і кріплення у східному магістральному відкаточному штреку №2 гор. 480 м шахти Західно–Донбаська (ПК 124+1,5 м): Δ – кріплення у покрівлі, ▲ – кріплення у боках, ◇ – породи покрівлі, ♦ – породи підосви

Східний магістральний штрек гор. 350 м шахти ім. Героїв космосу проведено у шарі аргіліту потужністю 7 м і міцністю 8–14 МПа з перетинанням пласта  $c_{II}$  потужністю 0,8 м і міцністю 22–27 МПа.

Аналогічно до попередніх спостережень в межах до 30 діб відбулась стабілізація переміщень порід покрівлі, а інтенсивність здимання порід від початкових 6 мм/добу зменшилась до 1,3 мм/добу після виконання тампонування на 40–45 добу спостережень (рис. 2).

За аналізом спостережень визначено, що показники деформування рамного піддатливого кріплення співпадають з показниками переміщень контуру порід як за часом, так і інтенсивністю, однак додаткове встановлення кріплення у зворотному склепінні з відставанням від вибою проведення виробки запобігає впливу на нього проявів початкового гірського тиску.

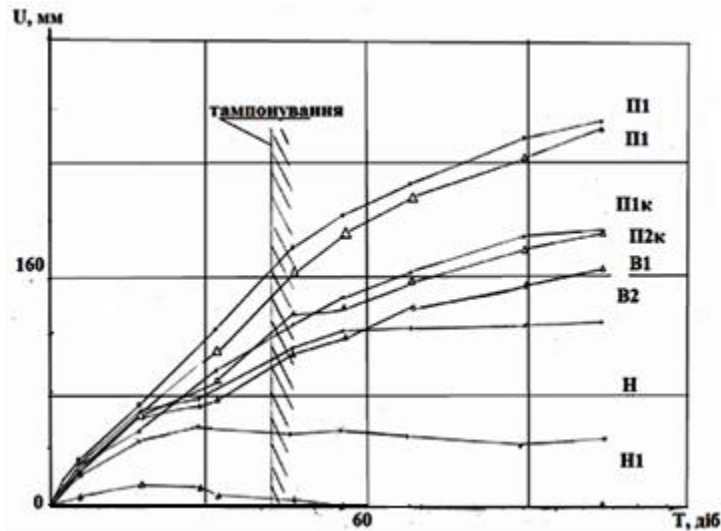


Рисунок 2 – Переміщення контуру порід і кріплення у східному магістральному штреку гор. 350 м шахти ім. Героїв космосу (ПК 86+2,5 м): Н та Н1 – порода та кріплення в покрівлі, В1 та В2 – породи лівого та правого боків, П1 та П2 – породи підосви лівої та правої сторони

За умови підтримання виробки в масиві остаточна швидкість здимання кріплення складає 0,2...0,6 мм/добу. Відмінності деформування порід і кріплення виникають у процесі горизонтального зменшення ширини контуру виробки, де конвергенція порід досягає 300–400 мм за 300 діб, а за наявності кріплення зворотного склепіння переміщення конструктивних елементів не перевищують 60 мм за той самий період, хоча остаточна швидкість конвергенції для порід і кріплення співпадає (0,25 мм/добу).

Результати натурних спостережень за руйнуванням порід в масиві наведені на рис. 3.

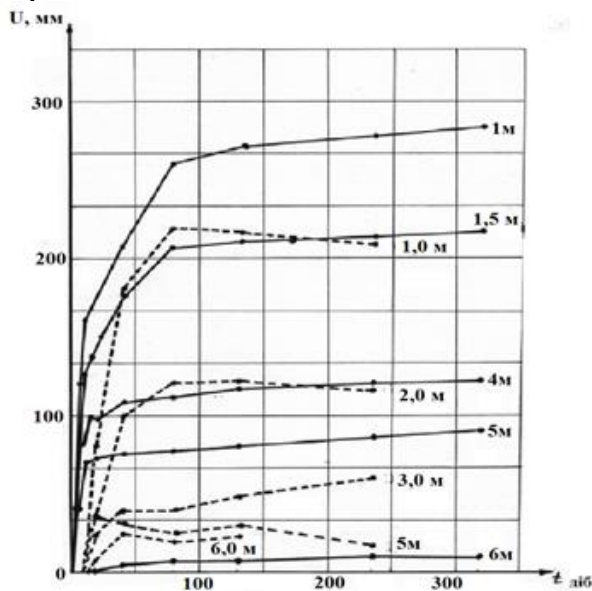


Рисунок 3 – Розшарування порід навколо східного магістрального відкаточного штреку гор. 480 м шахти Західно–Донбаська (ПК 162+5 м): репери 20 м у покрівлі та 10 м у підосві – умовно непорушні: суцільна – породи підосви, штрихова – породи покрівлі

Геологічний розріз масиву в місці закладання глибинної спостережної станції відповідає наведеному для східного магістрального відкаточного штрека №2 гор. 370 м шахти ім. Героїв космосу. Результати спостережень в породах покрівлі (рис. 4.) показують, що до глибини 1,0...1,5 м зміщення відбувається

інтенсивно в перші 50–70 діб. Більш глибокі шари порід мають меншу амплітуду переміщень та деформуються із відставанням у часі. Після 70–90 діб спостережень в покрівлі спостерігається інтенсивний процес ущільнення обрушених порід покрівлі в діапазоні 1–2 м товщі обвалених порід, яка стискається налягаючими породами покрівлі і зменшує потужність обрушеної товщі на 5 % при потужності обрушених порід 2 м та 9 % – для потужності 1 м у покрівлі. Прояви демпфуючої здатності товщі розшарованих порід проявляються у компенсації зростання зовнішніх навантажень піддатливістю товщі обвалених порід в результаті ущільнення розпушених порід. За 3–5 % ущільнення (відповідає коефіцієнту розпушування 1,03–1,05) двометрова товща порід має піддатливість до 100 мм.

Геологічний розріз масиву в місці закладання глибинної спостережної станції для вивчення здимання порід відповідає наведеному для східного магістрального відкаточного штрека №2 гор. 370 м шахти ім. Героїв космосу.

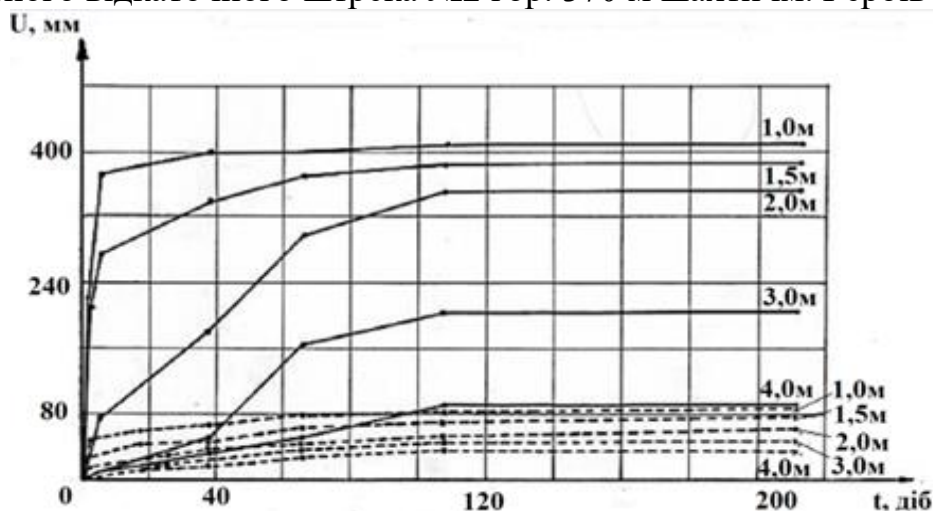


Рисунок 4 – Руйнування порід підосви у східному магістральному відкаточному штреку №2 гор. 370 м (ПК 89+3 м): суцільна – породи лівої сторони, штрихова – породи правої сторони

Результати спостережень за здиманням порід у східному магістральному відкаточному штреку № 2 гор. 370 м дозволили визначити швидкість розшарування порід в глибину, яка складає в середньому 60–80 мм/добу (рис. 4). Здимання порід на глибині 1 м досягає 400 мм за 8 діб (50 мм/добу) та з глибиною затухає з коефіцієнтом 1,3 рази на кожен метр потужності (85 мм на глибині 4 м), але характерним є нерівномірне розповсюдження по ширині виробки, для порівняння, здимання з протилежного боку виробки склало не більше 60 мм на глибині 5 м.

В залежності від ширини виробки та міцності масиву область руйнування порід при здиманні можна поділити на характерні за розпушуванням порід зони: глибиною до 1,5...2 м, і від 2...3 м до 4...5 м (рис. 5).

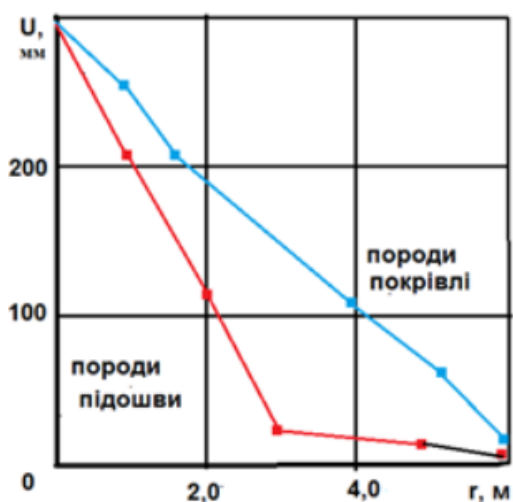


Рисунок 5 – Порівняння показників руйнування порід у покрівлі та підшви в залежності від відстані в глибину масиву

Кожна з цих зон розпушується з характерними рівнем. Так, зона до 1,5...2 м має коефіцієнт розпушування  $K_p = 1,24 \dots 1,33$ , зона на глибині від 2 м до 4...5 м має  $K_p = 1,02 \dots 1,10$ .

Однак спостерігались випадки, коли на глибині 5 м зафіксовано розпушування  $K_p = 1,17$ , що вказує на нерівномірний характер руйнування порід за глибиною.

Для визначення зони впливу робіт з виймання пласта були проведені інструментальні спостереження деформування порід навколо магістральних

виробок в межах створу наближення лави, як приклад, наведені результати на рис. 6.

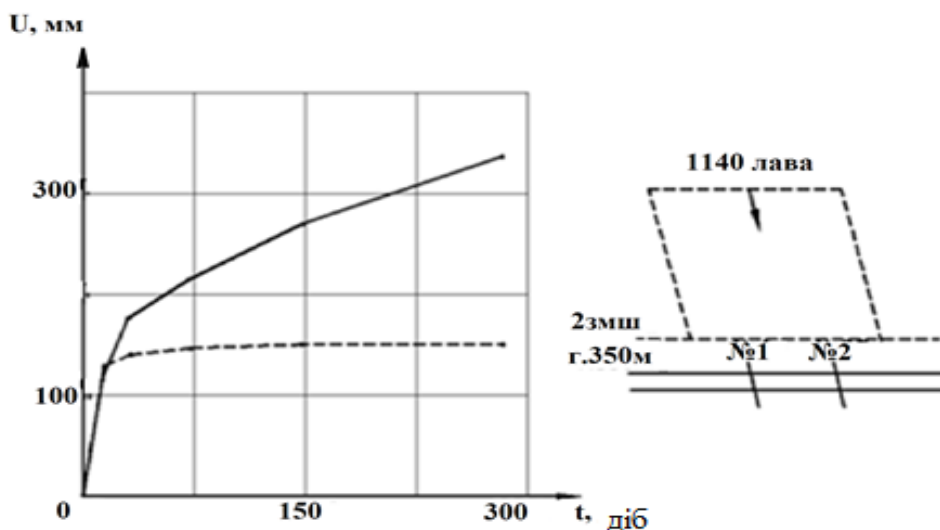


Рисунок 6 – Деформування порід в західному магістральному відкаточному штреку № 1 гор. 370 м у створі 1140 лави (ПК118–1,2 м): штрихова – породи покрівлі, суцільна – породи підшви.

Спостереження за переміщенням порід в зоні впливу лав проведені за різного розташування магістральної виробки відносно пласта: у 20 м нижче пласта, в 4...5 м вище пласта та з безпосереднім перетинанням пласта.

В результаті спостережень встановлено, що максимальне зростання інтенсивності конвергенції порід навколо виробки відбувається при розташуванні магістрального штреку з перетином пласта, швидкість деформування порід за фронтального впливу вибою зростає у 2,0...2,5 рази.

В той же час зафіксовано збільшення швидкості опускання порід покрівлі також у 2 рази. Але абсолютні переміщення порід підосви у 4 рази вище, ніж для порід покрівлі. Період інтенсивного впливу робіт у лаві складає 7–8 місяців.

Узагальнення результатів спостережень наведено на рис. 7. Аналіз результатів підтримання за період від 3 до 8 років дозволив виділити три характерних періоди інтенсивності деформування масиву навколо виробок:

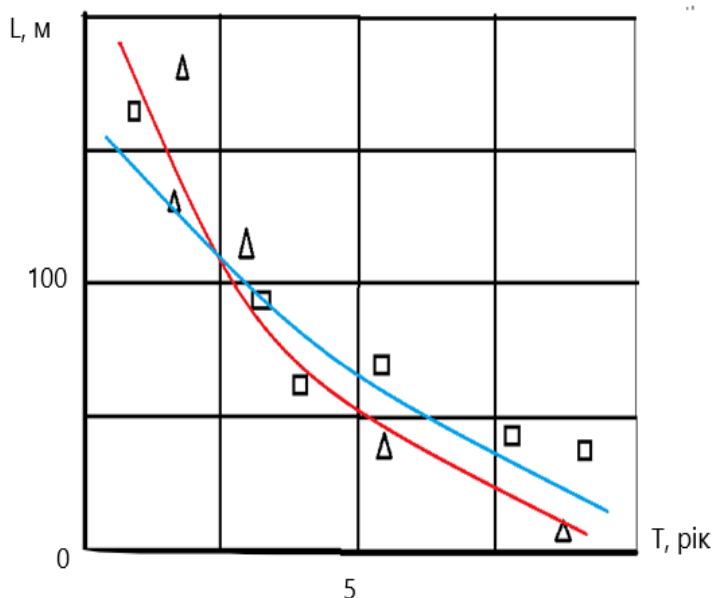


Рисунок 7 – Затухання зони впливу після зупинки лави: трикутник – в аргілітах, квадрат – у піщаниках

розвитку – затухання (20 – 100 мм/міс.), інтенсивної (100–500 мм/міс.) та залишкової конвергенції порід (1 – 20 мм/міс.), і визначено їх тривалість: інтенсивного деформування – від 6 до 24 міс., розвитку (затухання) – від 2 до 6 міс.

Також встановлено, що в існуючих навколо виробок областях руйнування порід може бути ініційований розвиток зон руйнування порід дією геотехнічних збурень (проведенням паралельної виробки, впливом опорного тиску від лави, виконанням перекріплення або підривання порід та ін.).

Як приклад, на рис. 8 наведено етапи розвитку зони підвищеного гірського тиску навколо виробок за оконтурювання магістральних виробок ділянками відпрацьованих лав.

Для виконання розрахунків переміщень порід  $U$  в умовах досліджуваних шахт за допомогою пакету прикладних програм «Недра» (ВНИМИ) на базі результатів натурних спостережень була скоригована залежність (1), яка для аргілітів матиме вигляд:

$$\frac{r_p}{r_H} = 1,5 \left( \frac{\gamma H}{R_c} + 0,898 \right) + 1 \quad (1)$$

Порівняння результатів перерахунку за скоригованим значенням радіуса руйнування  $r_p$  та залежної від нього величини переміщення  $U$  дозволили визначити, що рівень відхилення від фактичних значень не перевищує 18 % (табл. 1).

Аналіз результатів дослідження переміщень контуру гірничих виробок показує, що в початковий період деформування порід відбувається зі швидкістю до 0,03 м/добу, а остаточно швидкість зменшується у 15 разів і



більше. Для магістральних виробок, де строк експлуатації складає 15–35 років, зрушення у початковий період складають в межах 10 % від загальних переміщень порід усталеного періоду, а враховуючи незатухаючий характер переміщень контуру порід, за весь період служби виробки не перевищують 5 %.

Таблиця 1 – Порівняння результатів розрахунку переміщень контуру

Назва виробки	Переміщення порід, $U$ , м			Похибка, %	
	за нормативом	$U$ скор.	$U$ факт.	за нормативом	$\Delta U/U$ скоригов.
СМВШ №2 г. 480 м	1,07	0,55	0,46	133	18,0
СМВШ №1 г. 350 м	1,09	0,51	0,47	132	8,5
СМВШ №2 г. 370 м	0,93	0,32	0,34	174	6,0



Рисунок 8 – Схема розвитку зони підвищеного гірського тиску в мережі гірничих виробок під впливом видобувних робіт на шахті Західно–Донбаська

В **третьому розділі** виконано дослідження механічних властивостей слабометаморфізованих порід.

Для типізації літологічного складу геологічного масиву було проаналізовано результати випробувань з розвідувальних свердловин в межах діючих шахт Павлоградсько–Петропавловського району, з яких до розгляду прийнято результати випробувань зразків з кривого матеріалу. Загалом вуглепородний масив детально розкритий діючими шахтами, тому виконано аналіз структурних розрізів масиву по всій свиті пластів ( $c_1...c_{11}$ ).

Для оцінки впливу, як основних факторів, глибини масиву та міцності порід виконано порівняльний аналіз результатів зразків з керованих проб геологорозвідувальних свердловин і зразків із шахтних монолітів, які були відібрані з місць найближчого підсікання гірничими роботами розвідувальних свердловин.

Цей аналіз проведено для всіх шахт ТОВ «ДТЕК Павлоградвугілля» з напруженим станом масиву у діапазоні  $\gamma H/R_c = 0,2 \dots 1,2$ . Для порівняння використано показники геологорозвідувальних зразків та 327 шахтних монолітів для всіх літотипів порід за однаковою глибиною залягання. Окремо виділений граничний стан масиву ( $\gamma H/R_c = 1$ ). Результати порівняння підтвердили залежність ступеню послаблення масиву від геомеханічного показника  $\gamma H/R_c$  (рис. 9).

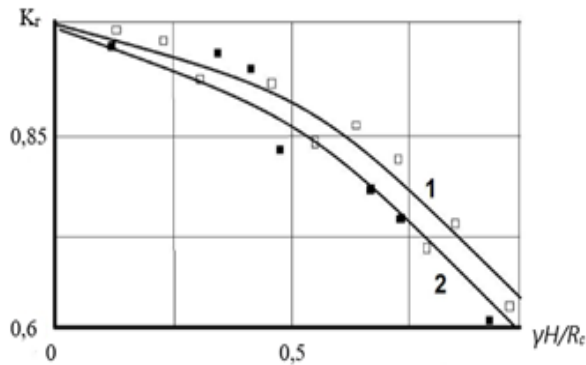


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта геомеханічного послаблення порід від показника стійкості породних оголень: 1 – аргіліти, 2 – алевроліти

Для відомих значень структурного послаблення і втрати міцності за зволоження зразка отримана залежність впливу геомеханічних умов на коефіцієнт послаблення, яка емпірично описана виразом:

$$K_g = 1 / [1 + a(\gamma H / R_c)^m], \quad (2)$$

де емпіричні коефіцієнти  $a$  і  $m$  для аргілітів та алевролітів складають відповідно 0,429 і 3,3 та 0,492 і 3,4. Випробування порід за повною діаграмою деформування проведені в лабораторії механічних випробувань на приладі БВ–21 (ВНИМИ).

Результати випробувань порід на одновісне стиснення в залежності від шаруватості наведені на рис. 10.

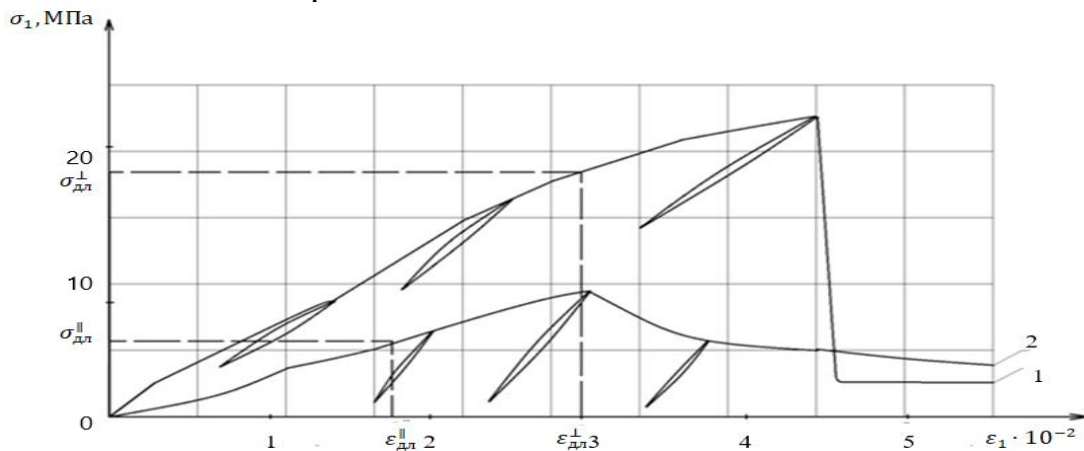


Рисунок 10 – Повна діаграма деформування аргіліту в залежності від напруження порід: 1 – перпендикулярно шаруватості; 2 – паралельно шаруватості



Значна відмінність між деформуванням аргіліту зп різного напрямку навантаження спостерігається на позамежовій ділянці. Модуль спаду  $M$  при навантаженні перпендикулярно шаруватості в 59 разів більше, ніж при навантаженні паралельно шаруватості. Таким чином, в першому випадку порода майже миттєво втрачає несучу здатність, в той час, як при стисненні паралельно шаруватості, її несуча здатність зменшується поступово без наявного розриву суцільності порід. Отримані експериментальні діаграми деформування порід математично апроксимовані для порід залежністю між деформаціями та напруженнями у вигляді ступеневої функції:

$$\sigma = b \cdot \varepsilon^{\lambda} \quad (3)$$

Проведені стабілометричні випробування на об'ємну міцність та за повною діаграмою при об'ємному стисненні дозволили отримати узагальнений вираз паспорту міцності порід:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - R_c (\sigma_1 + \sigma_3) = 0 \quad (4)$$

Цей вираз був використаний для проведення аналітичних досліджень.

Застосовуючи методику «пам'яті гірських порід», на приладі БА–22 виконані дослідження на боковий розпір, що дозволило підтвердити гідростатичний розподіл геостатичних напружень з похибкою в межах 14 %.

Для дослідження форм руйнування зразка за результатами інструментальних спостережень встановлено швидкість розшарування порід покрівлі (0,2...4,5 м/добу), тому що безпосередньо консольне зависання порід покрівлі визначає навантаження бокових порід навколо виробки. Відповідна швидкість деформування зразків задавалась у визначеному діапазоні (0,05...5,0 мм/хв). Рівень бокового тиску ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) приймався відповідно до діапазону  $(0...3)\gamma H$ , що складає 0...40 МПа.

Спільний вплив швидкості деформування і рівня бокового тиску на позамежове руйнування порід у вигляді повної діаграми деформування зразка досліджено при випробуваннях на приладі БВ–21. В кожній серії реєструвалися залежності  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  та  $\varepsilon_2(\varepsilon_1)$ , зразки після руйнування виймалися з приладу і фотографувалися, елементи зразків складали і безпосереднім вимірюванням фіксували кут нахилу магістральної тріщини, яка поділила зразок на окремі частини. Узагальнення результатів випробувань наведено на рис. 11.

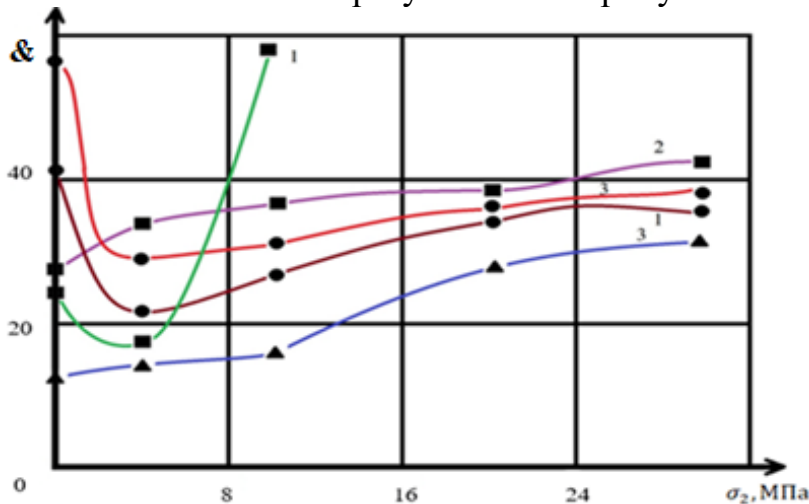


Рисунок 11 –  
Залежність кута нахилу тріщини  $\varphi$  від бічного тиску для швидкості деформування 0,5 мм/хв (1), 0,1 мм/хв (2) та 0,05 мм/хв (3):

- – аргіліт,
- ▲ – піщаник,
- – алевроліт.

Враховуючи агрегатно–неоднорідну структуру слабометаморфізованих порід і розвиток тріщин у вигляді підсумовування актів зсуву–розриву, зміна кута нахилу тріщин визначається переважаючим розвитком одного з типів руйнування: за збільшення швидкості переважає руйнування розривом, за збільшення бокового тиску – руйнування зсувом.

Таким чином, перемінним режимом навантаження гірської породи в межах приконтурного масиву ( $\sigma_2 > \gamma H$ ) навколо виробки породний масив поділяється магістральними тріщинами з відповідним кутом на блоки різної форми за рахунок перетинання тріщин між собою.

В лабораторних умовах було виконані дослідження деформування розпушених аргілітів на стискання з різним боковим підпором. Зразки для іспитів витримувались в ексикаторах у сухому стані не менше 48 годин. Узагальнення результатів дозволило запропонувати математичне описання деформаційної діаграми у вигляді степеневого поліному.

В **четвертому розділі** виконано дослідження формування та розвитку руйнування порід навколо виробки.

Після утворення виробки накопичена потенційна енергія навколо виробки витрачається на деформування і руйнування порід, навантаження конструкції кріплення, акумулюється у вигляді залишку потенційної енергії в зоні пружного стану порід та частково розсіюється або перетворюється на тепло.

Загалом для цього процесу можна записати рівняння рівноваги:

$$A - \Delta R - \Delta \Pi - Q - K = 0 \quad (5)$$

де:  $A$  – повна потенціальна енергія порід в межах області впливу виробки на масив (наведено вище);  $\Delta R$  – енергія, що витрачається на утворення поверхонь тріщин руйнування;  $\Delta \Pi$  – залишок потенційної енергії;  $Q$  – робота, що витрачається на деформування кріплення;  $K$  – енергія, розсіяна у вигляді тепла.

Після визначення складових рівняння рівноваги (5) загальний вигляд рівняння балансу енергії буде мати вигляд:

$$\frac{(\gamma H)^2}{2E} V - \frac{\nu N(R^*)^2}{K_{mp} K_e 2E} V - \frac{N(R^*)^2}{2E} V - \frac{q l b a}{2} = 0 \quad (6)$$

Розв'язуючи цей вираз відносно швидкості переміщень контуру виробки отримуємо:

$$\nu = K_{mp} K_e \left[ \frac{(\gamma H)^2 - q E l b a}{N(R^*)^2 V} - 1 \right] \quad (7)$$

Таким чином, отримана залежність, що пов'язує руйнування порід шляхом розростання тріщин в масиві і швидкістю переміщення порід контуру, однак витрати енергії на дисипацію тепла можуть бути відкинуті у зв'язку з порівняно незначними глибинами і температурним градієнтом порід Західного Донбасу.

Для підтвердження отриманих залежностей (5–7) було виконано математичне моделювання у прикладній програмі "NASTRAN". Особливістю застосування цієї програми є можливість послідовного накладання навантажень на досліджуваний об'єкт.

Результати моделювання показали формування радіальних зон навколо виробки, де відбувається початкове енерговиділення масиву у вигляді розвантаження відслонених породних поверхонь (рис. 12). Як результат інтенсивного розвантаження масиву виникають і охоплюють ділянки приконтурного масиву зони пластичного руйнування (за критерієм Мізесу) (рис. 13).

Далі досліджена розрахункова задача розподілу напружень у постановці плоскої деформації описана за допомогою полярної системи координат (рис. 14).

Рішення отримуються за допомогою методу збурень малим параметром, який передбачає розкладання відомого узагальнюючого рішення у ряд Фур'є за гармоніками малого параметру.

Для умов виникнення руйнування порід навколо виробки покладемо початкові умови: виробка круглої форми радіусом  $r_0$  розташована на глибині  $H$ . Початковий напружений стан масиву є гідростатичним і всі складові тензору напружень дорівнюють тиску від ваги порід  $p$  (рис. 14).

Напруження в області руйнування представлено рядами Фур'є за ступенями малого параметру:

$$\sigma_{ij} = \sum_{K=0}^{\infty} \varepsilon^K \sigma_{ij}^{(K)}, \quad (i, j = r, \theta) \quad (8)$$

Після відповідних математичних перетворень і вирішення системи лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь у вигляді суми часткового розв'язку неоднорідного рівняння та загального рішення однорідного рівняння функція напружень з урахуванням нульового та першого наближення буде має вигляд:

$$U_1 = U^{(0)} + \varepsilon U_1^{(1)} = (\mu + 2)^{-1} q r^{\mu+2} + \varepsilon m_1 \sin \theta (r^3 - 2\mu^{-1} r^{\mu+1}) \quad (9)$$

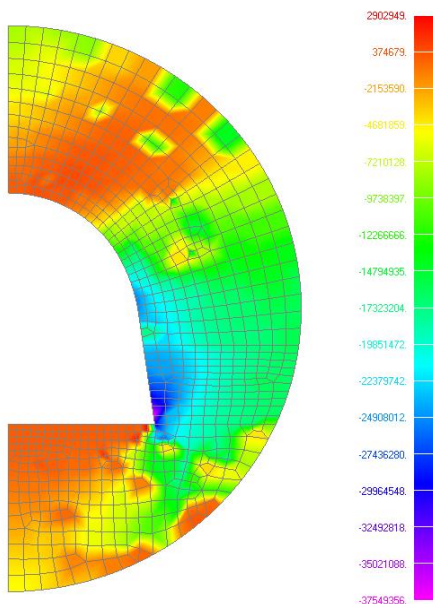


Рисунок 12 – Розвиток зон енерговиділення масиву розвантаження відслонень

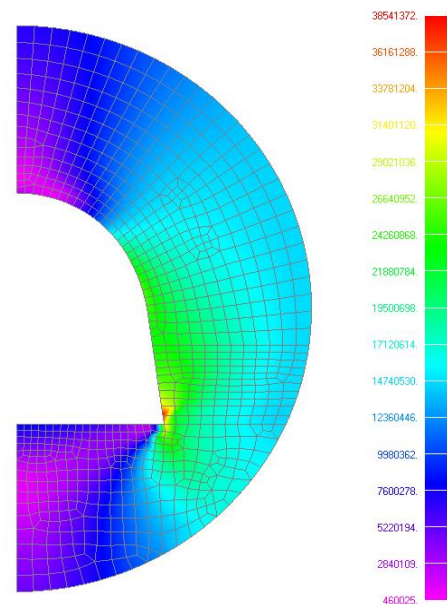


Рисунок 13 – Формування області пластичного руйнування за критерієм Мізесу

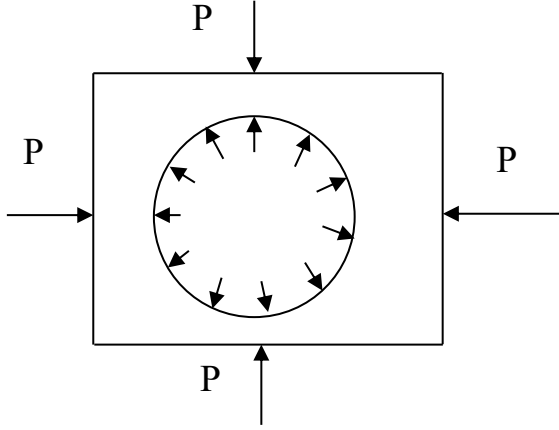


Рисунок 14 – Розрахункова схема задачі: P – тиск в масиві, R – опір кріплення

Визначення форми пластичної межі можна отримати виходячи із спряження полів розподілу напружень в зоні непружних деформацій, що описується (7), і пружного поля.

Компоненти тензору напружень в зоні руйнування відповідають початковим умовам та забезпечують граничні умови:

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(0)} + \varepsilon \sigma_r^{(1)} &= q r^\mu + 2\varepsilon m_1 \sin \theta (r - r^{\mu-1}) \\ \sigma_\theta^{(0)} + \varepsilon \sigma_\theta^{(1)} &= -2\varepsilon m_1 \cos \theta (r - r^{\mu-1}) \\ \tau_{r\theta}^{(0)} + \varepsilon \tau_{r\theta}^{(1)} &= -2\varepsilon m_1 \cos \theta (r - r^{\mu-1})\end{aligned}\quad (10)$$

За принципом суперпозиції, дійсному за урахування перших ступенів розкладання по малому

параметру, можна отримати узагальнений вираз зони руйнування:

$$Z = \omega(\xi) = r_* \left( \xi + \sum_{\xi=1}^5 \varepsilon_\xi e^{i\theta_\xi} \sum_{K=0}^{\infty} \delta_k^{(\xi)} \xi^{1-k} \right)^5 \quad (11)$$

Компоненти головного вектора зовнішніх сил можна визначити із умови його рівності масі породи в зоні непружних деформацій:

$$x + iy = -i\gamma\pi(D^2 - 1) \Rightarrow x = 0; \quad y = -\gamma\pi(D^2 - 1) \quad (12)$$

Тоді, застосувавши ці умови, отримуємо:

$$\alpha_0 = i\gamma \left( \frac{H}{H+1} \cdot \frac{D^2 - 1}{\mu_p} + \frac{2m_1}{\gamma\mu q D} \right) \quad (13)$$

Графічний вигляд отриманих залежностей представлено на рис. 15.

Для визначення критерію стійкості оточуючого масиву за методами теорії розмірностей розглянуто поперечний переріз горизонтальної виробки і складено безрозмірні комплекси, які характеризують форму зони руйнування і показників її максимального розповсюдження. Будь-яка геометрична фігура еліптичного обрису може бути визначена двома параметрами: малою ( $a$ ) і великою ( $b$ ) вісями, а їх співвідношення безрозмірне  $\left(\frac{a}{b}\right)$ .

З іншої сторони, фізичний процес руйнування порід достатньо точно характеризується межею міцності породи, тоді руйнування порід в покрівлі визначається показником міцності на розтягнення ( $R_{p\parallel}^*$ ), а в боках – на стиснення ( $R_{cm\perp}^*$ ), співвідношення яких теж є безрозмірним. Дорівнюючи ці комплекси отримаємо умову існування рівноважного стану масиву навколо виробки у вигляді функції:

$$\left(\frac{a}{b}\right)^2 = \Phi \left[ \frac{R_{p\parallel}}{R_{cm\perp}^*}, \left(\frac{R_{p\parallel}}{R_{cm\perp}^*}\right)^2, \left(\frac{R_{p\parallel}}{R_{cm\perp}^*}\right)^3, \dots \right] \quad (14)$$

Отримавши аналітичний вираз і порівнявши результати розрахунків з фізичними процесами в масиві доведено належну збіжність виразу (14).

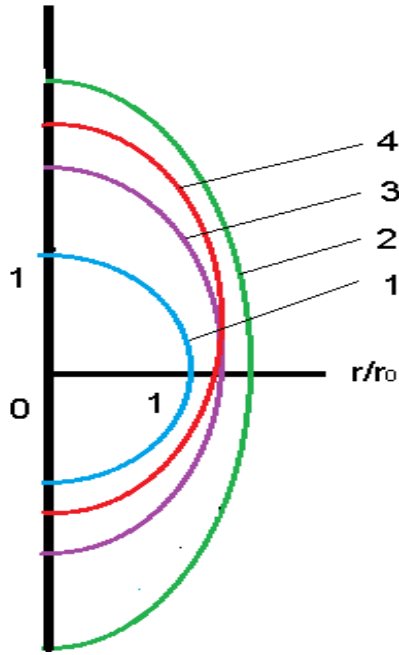


Рисунок 15 – Розташування зон деформування порід навколо виробки (1) при врахуванні анізотропії порід (2), міцнісної неоднорідності (3) та ваги зруйнованих порід (4)

Для створення розрахункової моделі деформування порід зануренням блоків зруйнованих порід застосовано теоретичні положення механіки контактної взаємодії. Для цього завдання у плоскій постановці існують наближені рішення за вертикального занурення клину. Пружне рішення для контактної задачі у постановці взаємодії без тертя отримано Дундурсом та Лі, Дутос, Теокаріс та Комінноу для контакту з тертям, Боджі – за відсутності прослизання.

Приведення умов задачі до подібності умов занурення клиновидного блоку породи вимагає врахування тертя по берегах тріщин, яке пов'язано з відсутністю гладкого змикання поверхні тріщин. В цьому випадку має місце дві граничні умови:

відсутність тертя і його рівень, який приводить до зчеплення з поверхнею ковзання (рис. 16).

Другий варіант занурення з тертям має рішення на кутах загострення клину менше  $45^\circ$ , тоді нормальні і дотичні напруження на грані клину визначаються відповідно:

$$P = r^x (1 + \psi - \cos 2\alpha) \quad (15)$$

$$\tau = r^x \sin 2\alpha$$

Тиск занурення клинку, що відповідає моменту зчеплення з напівплощиною отримано Хеддоу:

$$P = 2r^x (1 + \psi) \quad (16)$$

Тепер можна розглянути рівновагу клиновидного блоку з прикладеними на гранях нормальними і дотичними напруженнями, а рівняння рівноваги буде мати вигляд:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} - 2r^x \frac{\partial \psi}{\partial \alpha} = 0$$

Рішення його за методом Ньютона з підстановкою (15) і (16) дозволяє отримати залежність тиску в процесі занурення:

$$P = 2x \left[ p_0 \operatorname{ctg} \alpha + \frac{1}{2} (1 + \sin \alpha) + \psi \right] \quad (17)$$

Залежність глибини занурення від вертикального тиску також може бути отримана виходячи з результатів натурних досліджень у вигляді степеневі функції:

$$h = aP^n \quad (18)$$

де  $a$  і  $n$  – параметри процесу занурення.

Для визначення параметрів  $a$  і  $n$  використано результати спостережень у західному магістральному відкатному штреку №2 гор. 350м (шахта ім. Героїв космосу), де за проведення присічної виробки були зафіксовані глибини занурення блоків. Для діапазону навантажень 8–13 МПа глибина занурення блоку склала близько 1 метру за період існування виробки 3,5 роки. Тоді показники параметрів  $a$  і  $n$  складають 0,501 і 0,101 відповідно.

Після визначення залежності глибини занурення  $\Delta U$  від вертикального тиску  $P$  і отримання горизонтальних переміщень зсуву шарів порід (рис. 17), як співвідношень прямокутного трикутника, можна замкнути послідовність визначення висоти здимання порід підшви виробки.

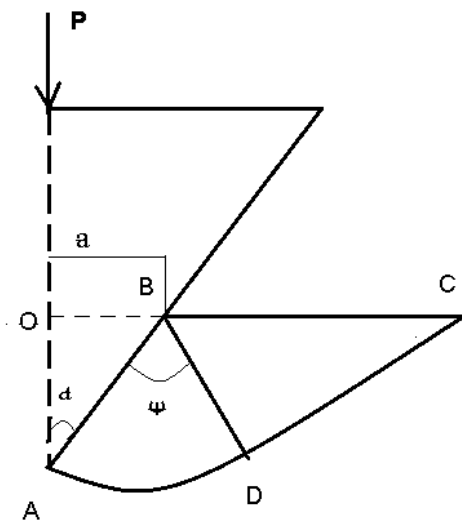


Рисунок 16 – Схема занурення гострого клину

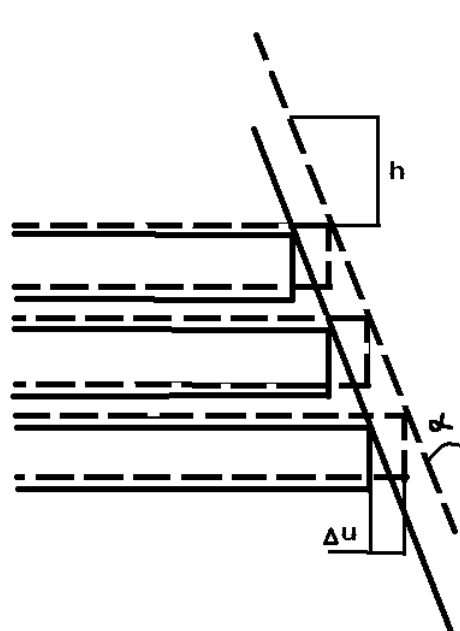


Рисунок 17 – Схема визначення горизонтальних переміщень порід при зануренні блоку

Для цього розглянемо екстремуми діапазону зрушень порід підшви у вигляді деформаційного процесу здимання складкоутворенням (рис.18) та торосуванням (рис.19).

Для першого варіанту, в якому досягається максимальне здимання порід, за умови нехтування пружними деформаціями і жорсткопластичному стані верхнього шару порід, можна припустити збереження лінійних розмірів утворюваних елементів, тоді висота здимання  $U_c$  після перетворень складає:

$$U_c = \sqrt{\Delta U(b + \Delta U)} \quad (19)$$

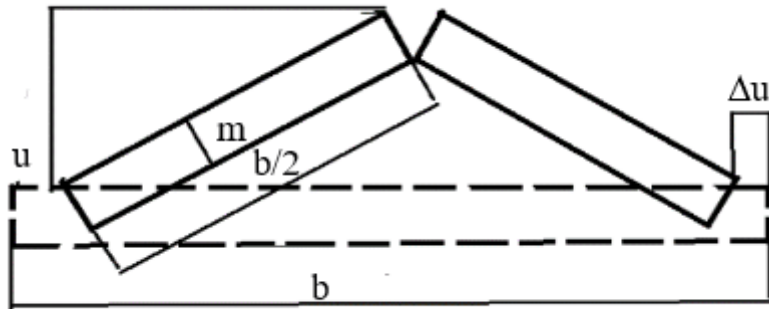


Рисунок 18 – Схема розрахунку висоти здимання складкоутворенням

Для випадку деформування порід з накладанням шарів (торосування), який розповсюджується на глибину порід підосви відповідно до глибини вертикального занурення породного клину  $h$ , висота здимання  $U_m$  може бути розрахованою за формулою:

$$U_m = 2 \sum_1^h m_i \quad (20)$$

де  $m_i$  – потужність шарів порід підосви до глибини занурення блоку, м.

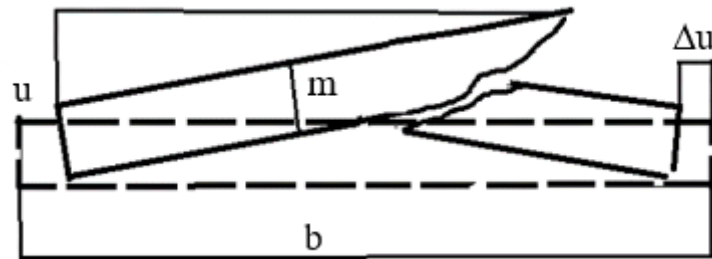


Рисунок 19 – Схема розрахунку висоти здимання торосуванням

Для розробки методики розрахунку навантажень на кріплення приймаємо, що головною причиною, яка визначає кінцеве переміщення порід контуру, є об'ємне розширення (розрихлення як руйнівна деформація). Гірнична виробка круглого обрису знаходиться на достатній відстані  $H$  від поверхні, а напружений стан гідростатичний (коефіцієнт Пуансона  $\nu = 0,5$ ), тоді можна розглядати вісесиметричну плоску задачу. Розрахункова схема представлена на рис. 20.

Виконавши аналітичні перетворення за умови, що зона А (зона руйнування) є однорідною, отримаємо переміщення:

$$U = \frac{2(1+\nu)r_L^2(\alpha_2\mathcal{H} + R_{cm})^2}{Er_0\alpha_2\alpha_3^2P} \quad (21)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассону,  $E$  – модуль Юнга.



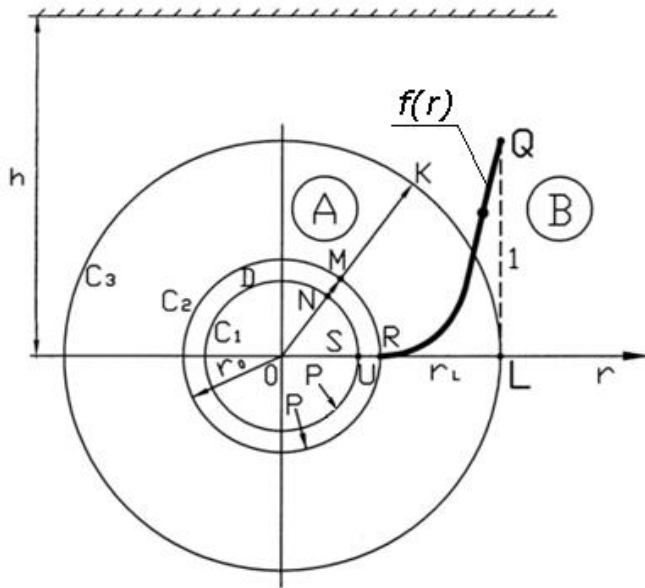


Рисунок 20 – Розрахункова схема для визначення навантаження на кільцеве кріплення від зруйнованих порід, де *A* – зона псевдопластичних деформацій між колами *C*<sub>2</sub> та *C*<sub>3</sub>; *B* – зона пружних деформацій розташована поза колом *C*<sub>3</sub>, *D* – зона між колами *C*<sub>1</sub> та *C*<sub>2</sub>, яка характеризує зменшення перерізу у момент кінцевої рівноваги системи «кріплення – масив»

Треба відзначити, що наведені дослідження розглядають взаємодію кріплення з масивом, який представлений як жорстко зафіксований контур непорушених порід через деформування зруйнованих порід. Однак, така взаємодія потребує коригування у вигляді доповнення навантаженням, що виникає за відокремлення порід від масиву у вигляді обвалювання. Для цього задаємо схему розвитку зони обвалення порід, побудовану на основі інструментальних спостережень (рис. 21).

Додаткова складова навантаження від обрушених порід складає:

$$P = 2\gamma^o \frac{\pi}{2} \left( ab - \frac{b^2 z^2 \left( \frac{1}{a^2} - 1 \right)}{x^2 (b^2 - 1)} \right) \quad (23)$$

де  $\gamma^o$  – об'ємна вага обвалених порід. Результати розрахунків наведені на рис. 22.

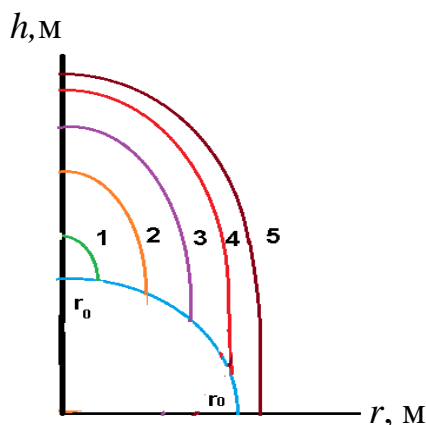


Рисунок 21 – Схема розвитку зони обвалення порід ( $r_0$  – радіус виробки, 1, 2, 3, 4, 5 – границя зони обвалювання на 10, 30, 60, 100 та 350 добу)

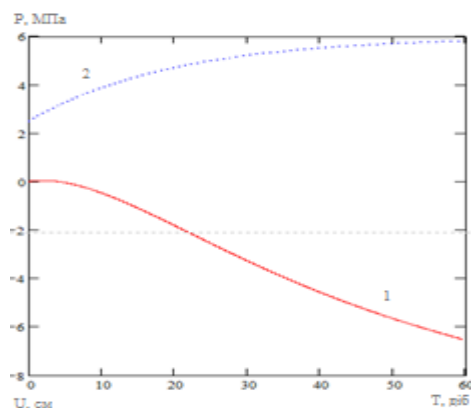


Рисунок 22 – Визначення навантаження від ваги обвалених порід у часі: 1 – піддатливість порід в результаті ущільнення, 2 – компенсація напружень від ваги обвалених порід



В п'ятому розділі наведено результати розробки і промислових випробувань засобів підтримання виробок в умовах руйнування приконтурних порід.

На шахті Західно–Донбаська (блок №2) були проведені порівняльні випробування замкнутих (рис. 23) і кільцевих (рис. 24) рамних конструкцій, в яких СВП замінили двотавровим профілем. Різні режими взаємодії кріплення з контуром порід дозволяють визначити напрямок врівноважування навколоконтурного масиву незалежно від напрямку розвитку максимальних переміщень порід.

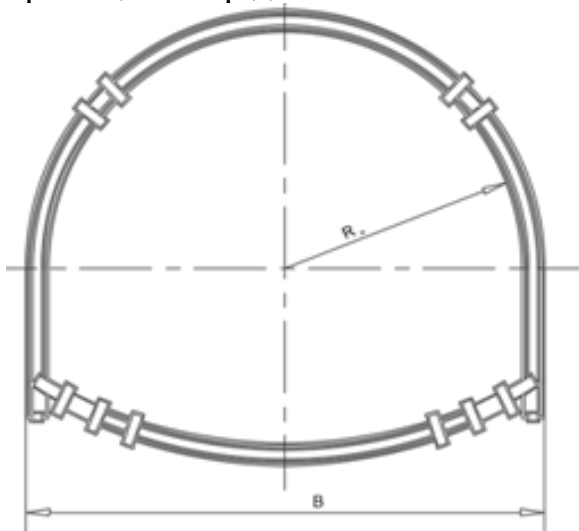


Рисунок 23 – Конструкція замкнутого кріплення з двотавра (КЗД)

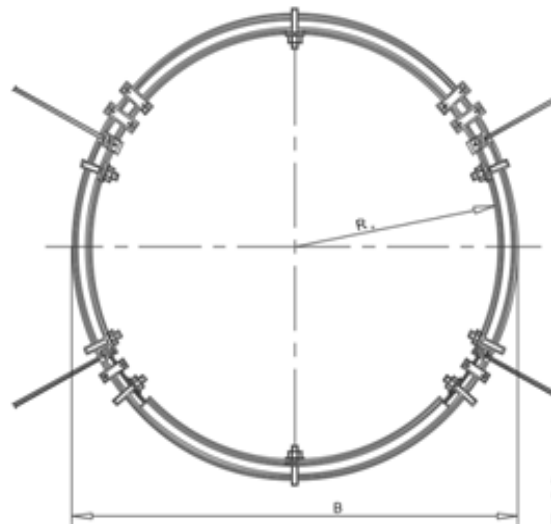


Рисунок 24 – Конструкція кільцевого кріплення з двотавра (КД) з елементами анкерного посилення

Результати порівняльних динамометричних спостережень наведені на рис. 25.

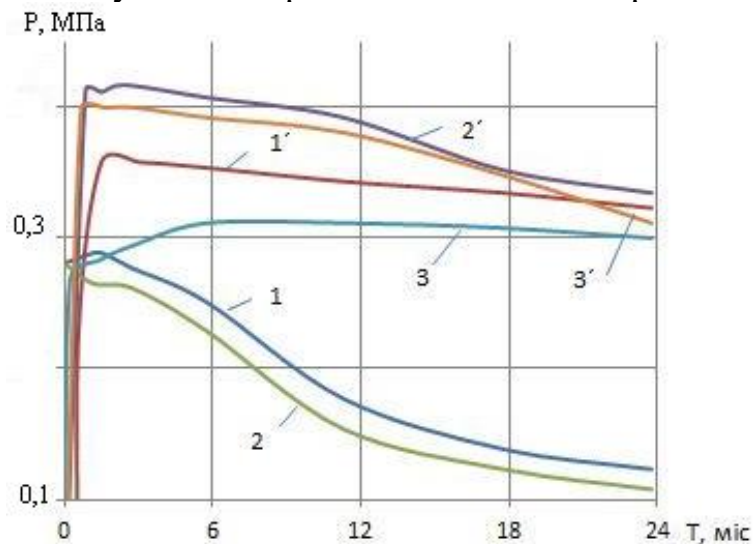


Рисунок 25 – Результати динамометричних досліджень конструкцій КЗД (1', 2', 3') та КД (1, 2, 3), де 1, 1' – у покрівлі; 2, 2' – з лівої сторони; 3, 3' – з правої сторони

Узагальнення результатів динамометричних замірів і обстеження закріпного простору дозволяють зробити висновок, що зафіксований інструментально ефект розвантаження жорсткої рамної конструкції є наслідком прояву демпфірувальної здатності товщі розшарованих порід, що виявляється у

компенсації зростання зовнішніх навантажень на кріплення в результаті ущільнення розпушених порід.

В період 24 міс. підтримання виробок навантажувальний режим конструкцій кріплення стабілізувався, що відповідає закінченню процесу ущільнення розшарованих порід і сформувався остаточний розподіл напружень гірського тиску навколо виробки.

Отримані натурні виміри порівняли з результатами розрахунків несучої здатності конструкцій за прикладною програмою "KREP-TM", розробленою у ТулПІ.

Для кільцевої конструкції КД зафіксовані початкові навантаження (0,25–0,28 МПа), які складають 37–45 % розрахункової несучої здатності, а остаточний рівень навантажень – тільки 18 % розрахункового опору. Розрахункова номограма конструкції КД наведена на рис. 26

Для розробки способів анкерного посилення були виконані масові випробування анкерного кріплення в шахтних умовах за допомогою штанговисмикувача МА–10. Навантажувально–деформаційні характеристики анкерних штанг оброблені статистичними методами і визначено достовірні параметри анкерного кріплення (рис. 27).

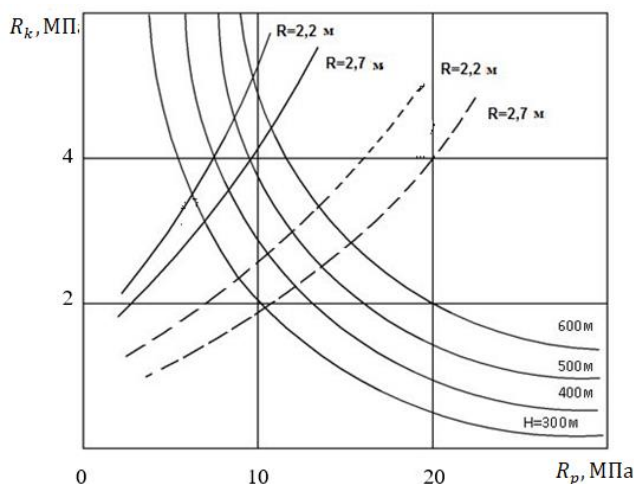


Рисунок 26 – Номограма усталеного гірського тиску та навантажувальна характеристика кріплення КД: 1 рам/м (суцільна), 0,5 рам/м (штрих.)

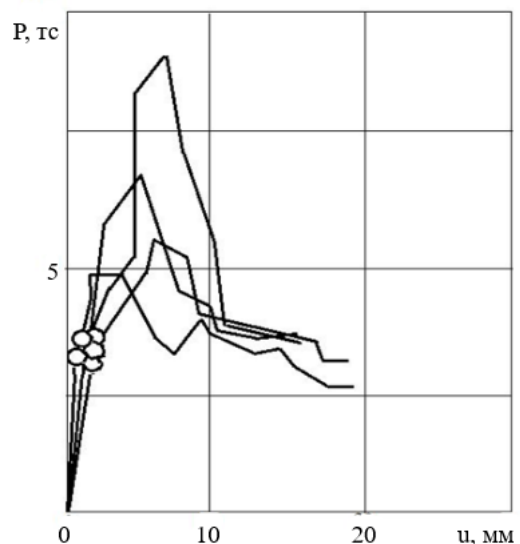


Рисунок 27 – Результати випробувань анкерних штанг на висмикування приладом МА–10

За результатами випробувань розроблено спосіб анкерування порід за радіальною схемою та закріпленням на рамі з тампонуванням патронованим в'язучим. Хвостові частини анкерів закріплюються на профілі рами через фігурну планку, натяг виконується за допомогою наскрізного з'єднання з охопленням профілю скобою (рис. 28).

За результатами випробувань розроблено методику розрахунку анкерного посилення кільцевих конструкцій, за якою визначено, що для умов Західного

Донбасу в процесі спорудження виробок площею перетину 12–16 м<sup>2</sup> для кільцевого кріплення з двотавру № 18 радіусом 2,2–2,7 м щільністю 0,5 рам/м достатньо встановлювати на кожну раму 4–8 анкерів (2–4 пари) з несучою здатністю 0,5 МПа на глибину до 2,5 м.

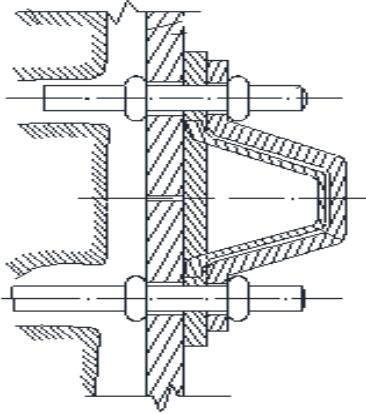


Рисунок 28 – Конструкція закріплення хвостової частини анкерної штанги на рамі

Для застосування комбінованих конструкцій кільцевого кріплення розроблено технологічні схеми поетапного проведення виробок з метою спорудження кільцевого кріплення по частинах, використанню анкерного посилення конструкції кріплення в умовах підвищеного гірського тиску і геомеханічної оптимізації параметрів поетапного створення перерізу виробки з метою інтенсифікації реалізації напружень гірського тиску для створення умов приведення масиву до врівноваженого стану.

Запропоновано технологічні схеми проведення виробок: а) з насипним шаром підшви; б) паралельними комбайновими вибоями; в) паралельними вибоями комбайна та підривної машини.

Для використання поетапного способу проведення виробок із кільцевим кріпленням розроблена номограма параметрів (рис. 29).

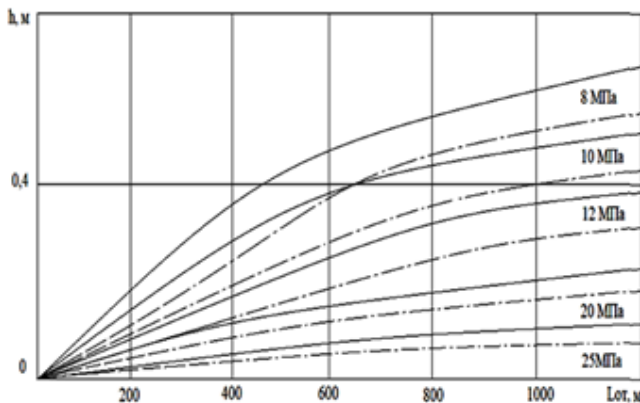


Рисунок 29 – Номограма потужності підривання підшви для порід різної міцності і площі перерізу (15,2 м<sup>2</sup> – суцільна, 9,6 м<sup>2</sup> – переривчата)

Для умов підтримання магістральних виробок поза зоною впливу гірничих робіт виконана розробка та перевірка способу перерозподілу навантаження на кріплення за допомогою камуфлетних підривань.

Випробування проведені на шахті «Степова» в умовах, де за підтримання виробок спостерігається здимання порід 0,2–0,4 м/рік. Як об'єкт прийнято західний магістральний штрек гор. 300 м перетином  $S = 9,8 \text{ м}^2$  (у світлі) і закріплений арковим рамним кріпленням з СВП22 з кроком

0,8 м, огороження – залізобетонна затяжка без тампонування закріпного простору.

Оточуючі породи представлені: алевролітом слюдистим, у формі лінз, з прошарками дрібнозернистого пісковика; з прихованою шароватістю аргіліт з

прошарками алевроліту; вуглистим аргілітом масивної текстури тріщинуватого з прошарками вугілля; вугільним пластом  $c_6$ , вельми тріщинуватим, обводненим; алевролітом грудкуватої текстури із залишками обвуглених кореневищ. Середня інтенсивність тріщинуватості порід 1–2 тріщини/м.

Відповідно до відомих методик розраховані параметри камуфлетних підривань, довжина шпурів і відстані між шпурами в залежності від заряду вибухової речовини (табл. 2). Результати спостережень за контуром ділянки камуфлетних підривань наведені на рис. 30.

Таблиця 2 – Параметри шпурів для камуфлетного підривання

Заряд ВР (№6 ЖВ), кг	Радіус подрібнення, м	Довжина шпурів, м	Відстань між шпурами, м
0,1	0,228	2,0	0,45
0,2	0,292	2,0	0,8
0,3	0,350	2,8	0,9
0,4	0,385	2,8	1,1
0,6	0,460	3,1	1,3

У порівнянні з контрольною ділянкою період безремонтної підтримки виробки збільшився у два рази і складає не менше 4 років.

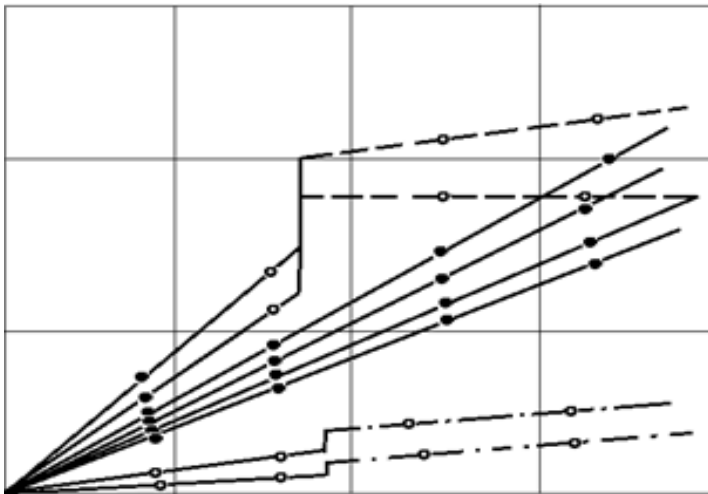


Рисунок 30 – Результати спостережень при проведенні камуфлетних підривань (суцільна лінія – контрольна ділянка, штрихова – підшва, штрихова через крапку – покрівля)

Для охорони магістральних виробок при фронтальному підході лави розроблено і перевірено спосіб охорони магістрального штреку компенсуючою виробкою.

Ефективність запропонованого способу охорони перевірено на шахті ім. Героїв космосу при підході 1142 лави по пласту  $c_{II}$  до західного магістрального штреку № 2 гор. 350 м.

В якості паралельної розвантажувальної виробки використаний 1162 бортовий штрек, що проводиться на відстані 30–40 м від магістрального, контрольною є ділянка цього штреку у створі 1140 лави.

Розвантажувальна дія бортового 1162 штреку особливо помітна у перші 200 днів (рис. 31). За цей період швидкість здимання порід на експериментальній

ділянці приблизно дорівнювала інтенсивності здимання порід поза зоною впливу видобувних робіт.

Через 300 діб відбулося збільшення швидкості здимання порід і опускання покрівлі на 70–100 % у порівнянні з попереднім періодом. Потім через 50–60 діб відбулося зменшення швидкості переміщень порід підосви і покрівлі до рівня деформування порід поза зоною впливу видобувних робіт. За період спостережень на експериментальній ділянці підривання проведено 2 рази на глибину 0,3 і 0,2 м.

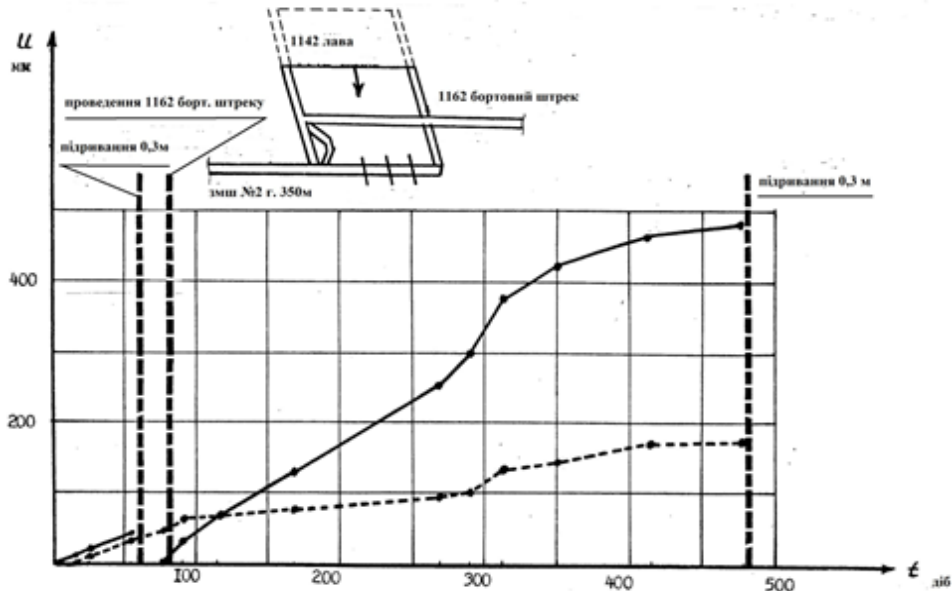


Рисунок 31 – Результати інструментальних спостережень переміщень контуру порід при підході лави до магістральної виробки: штрихова – породи покрівлі, суцільна – породи підосви

На контрольній ділянці штреку за цей час було проведено два підривання порід по 0,7 м і перекріплення виробки. Крім того, на контрольній ділянці якість кріплення магістрального штреку була вище, ніж на експериментальному (залізобетонне огородження і тампонування закріпного простору), в той час як на експериментальній ділянці – дерев'яне міжрамне огородження без тампонування порід.

В шостому розділі наведені результати впровадження отриманих науково-технічних рішень на будівництві Бескидського тунелю.

Геологічні умови ділянки будівництва характеризуються складною та тектонічно порушеною будовою масиву (рис. 32), який на порталних ділянках представлений перемішаними відкладеннями зруйнованих материнських порід. Заглиблена ділянка тунелю почергово перетинає перешаровані ділянки пісковиків та аргілітів, які розділені трьома розламами, заповненими тектонічною глиною.

Головними геомеханічними особливостями спорудження Бескидського тунелю є тектонічно порушений природний стан масиву та штучні зміни, внесені при початковому будівництві одноколійного діючого тунелю, розташованого

паралельно споруджуваному на відстані 30 м. Початкові дані для розрахунку стану масиву прийняті відповідно до діючих нормативних документів.

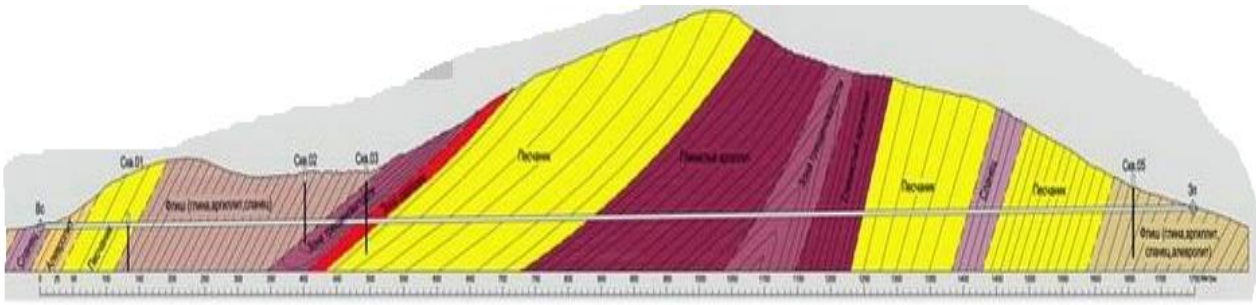


Рисунок 32 – Геологічний розріз бескідського масиву

Визначення поведінки масиву за умови розкриття повним перерізом виконано за допомогою пакета програм “PLAXIS” в породах  $f = 3-4$  (рис. 33), результати показали розвиток обвалення порід покрівлі до поверхні.

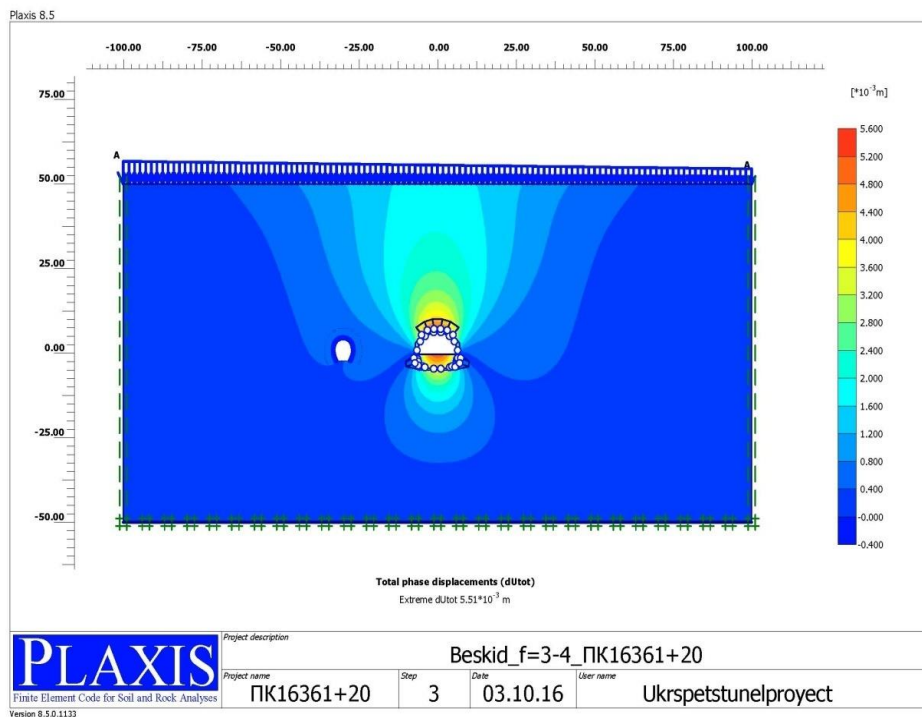


Рисунок 33 – Загальні деформації оточуючого масиву за спорудження тунелю повним перерізом

Тому для розглянутих умов запропоновано геомеханічний підхід побудови підземної споруди у вигляді заощадливого впливу на масив створенням перерізу тунелю по частинах: спочатку верхня (калота), потім нижня (штрос), а відповідна реакція оточуючого масиву на кожному етапі порушення стійкості компенсується адаптованим регулюванням опору конструкції кріплення.

Для визначення початкової реакції масиву на створення калотової частини тунелю проведено математичне моделювання умов будівництва у



геомеханічному програмному комплексі "Abaqus" (модуль Simulia/Explicit) (рис. 34).

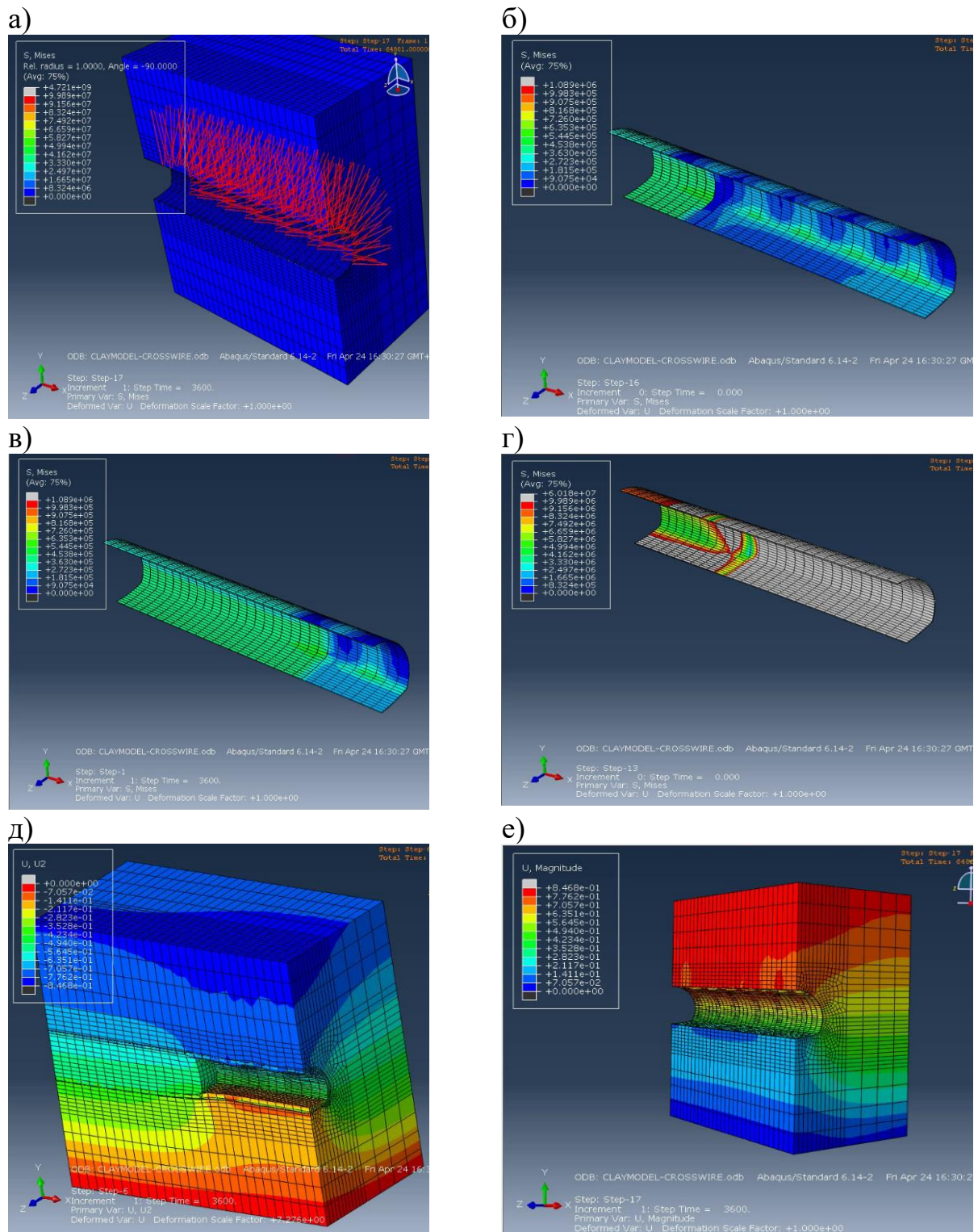


Рисунок 34 – Результати математичного моделювання умов будівництва (а – результати розрахунків навантаження анкерного кріплення; б – модель початкового нанесення набризк-бетону; в – модель нанесення набризк-бетону в привибійній зоні; г – модель початкового етапу затвердіння бетону;

д – результати розрахунку початкового етапу інтенсивного гірського тиску;  
 е – результати розрахунку для періоду спорудження троси.

Проведенням геомоніторингу масиву було передбачено натурні дослідження напруженого стану конструкції кріплення шляхом влаштування тензометричних датчиків, результати замірювання на яких наведені на рис. 35.

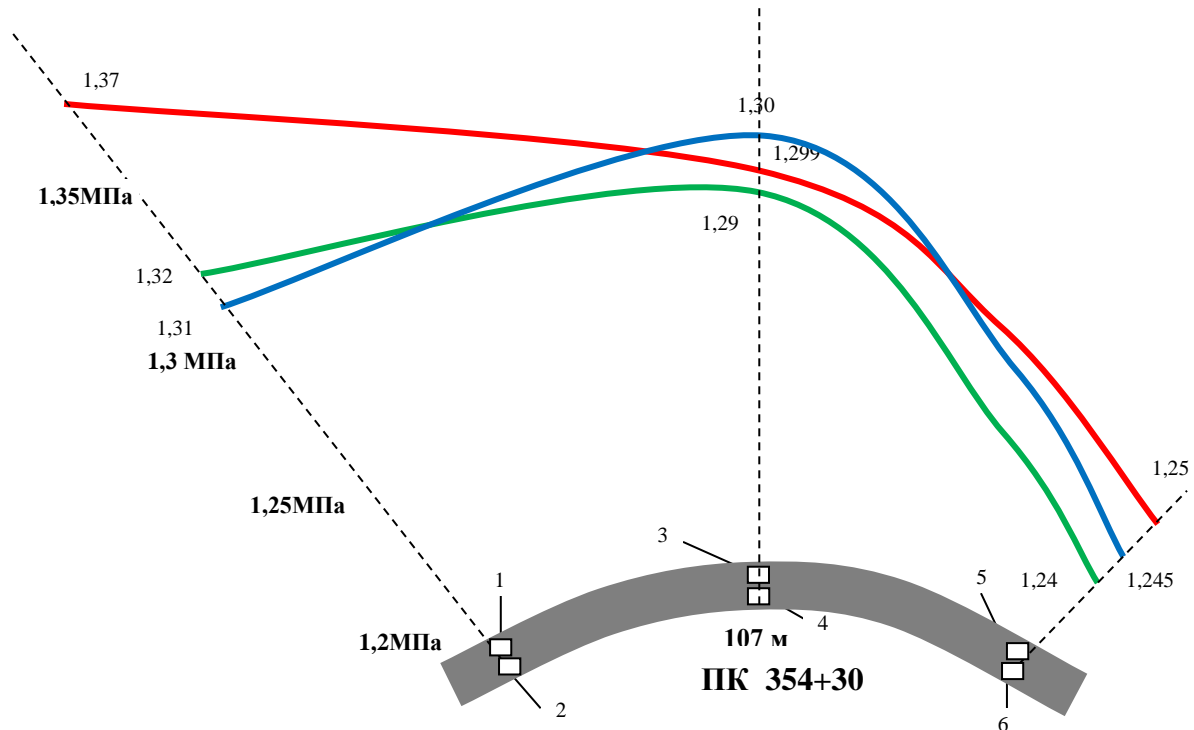


Рисунок 35 – Результати досліджень напруженого стану комбінованого кріплення тензометричним способом:

— навантаження після 1 дня монтування, — на 7 день, — на 30 день;  
 1...6 – місця закріплення тензодатчиків

В цілому, застосована комбінована конструкція "кільцеве кріплення – анкерне посилення – набризкбетонне огородження" забезпечила геомеханічну стійкість тектонічно порушеного масиву на період будівництва великогабаритного тунелю.

За результатами впровадження науково-технічних розробок всієї роботи річний економічний ефект склав 1653,079 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-практичної проблеми розвитку основ руйнівного деформування приконтурних порід слабометаморфізованого масиву дією геотехнічних збурень шляхом встановлення залежностей природних та технологічних параметрів засобів досягнення рівноваги системи «масив – зруйновані породи – кріплення» створенням керованої взаємодії елементів для стійкого підтримання виробок.



Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. За результатами аналізу наукових публікацій, які присвячені дослідженням механіки руйнування гірських порід, встановлені напрямки розробки засобів керування розвитком руйнування порід навколо виробки та на основі цього було розроблено методика досліджень проявів гірського тиску для умов виникнення руйнування оточуючих слабометаморфізованих порід.

2. Вперше визначено, що за перевищення межового напруженого стану ( $\gamma H > R^*$ ) утворення виробки у слабометаморфізованому масиві викликає інтенсифікацію енерговиділення потенційної енергії оточуючого масиву на глибину 0,7 – 0,9 діаметра виробки як прискорення розвантаження породних відслонень і реалізується у вигляді збільшення радіальної конвергенції порід: за швидкістю у 2,7 – 4,4 рази та початковим періодом у 1,5 – 2,8 рази.

3. Вперше обґрунтовано, що внаслідок структурно–механічних особливостей слабометаморфізованих порід (тонкошаруватість складання, зменшене міжшарове зчеплення і низька об'ємна міцність) інтенсивність розшарування порід покрівлі має як за глибиною, так і у часі, експоненційно затухаючий розподіл і у діапазоні 0,8–3,6 м/добу викликає розвиток руйнування бічних порід з поділом їх магістральними тріщинами на окремі блоки різної форми залежно від швидкості розшарування порід покрівлі.

4. Вперше запропоновано модель асимптотичного розвитку руйнування навколо виробки у вигляді затухаючого коливального перерозподілу нормальних напружень стискання та дотичних напружень розтягування в масиві, причому в умовах слабометаморфізованих порід зворотний взаємозв'язок руйнування бічних порід та наступної інтенсифікації розшарування порід покрівлі визначається додатковим збільшенням прольоту відслонення порід покрівлі за поширення руйнування бічних порід.

5. Вперше доведено, що врівноважений стан оточуючого масиву в процесі руйнівного деформування слабометаморфізованих порід навколо виробки досягається на основі загального механічного процесу розвитку зони руйнування та взаємодії дискретних елементів порід навколо виробки за умови досягнення зоною зруйнованих порід форми несиметричного еліпсу, яка відповідає еквівалентному співвідношенню квадратів головних вісей еліпсу руйнування до показника міцнісної анізотропії порід.

6. Встановлено, що за умови  $\frac{\gamma H}{R^*} > 0,75$  в межах одного літологічного шару слабометаморфізованих порід перевищення показника порізаності виробками більше 0,2 викликає утворення спільної зони підвищеного гірського тиску за рахунок об'єднання зон зруйнованих порід навколо кожної виробки, що має здатність радіального поширення в межах шару порід з додатковою інтенсифікацією цього процесу від паралельного проведення виробок, оконтурюванням ділянки масиву видобувними роботами та виконанням ремонтних робіт з вийманням зруйнованих порід.

7. Досліджено, що коефіцієнт послаблення міцності слабометаморфізованих порід, відслонених в шахтних умовах, пов'язаний з параметром  $\gamma H/R^*$  зворотно–степеневою залежністю.

8. Обґрунтовано для умов слабометаморфізованих порід параметри режиму "жорсткої" роботи комбінованої конструкції постійного кріплення, які, на відміну від ініціалізації розшарування порід у піддатливих конструкціях, в діапазоні розрихлення обрушених порід 1,05–1,33 створюють демпфуючу здатність цього шару порід за функцією степеневого поліному у системі взаємодії "масив – навколоконтурний шар зруйнованих порід – конструкція кріплення", де згасання інтенсивності навантажень від розшарування порід покрівлі додатково компенсується ущільненням і відновленням несучої спроможності порід.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджені на ТОВ «ДТЕК Павлоградвугілля», ДП «УкрНДІпроект», ПАТ «Укрспецтунельпроект», САІ «ІНТЕРБУДМОНТАЖ», що підтверджується відповідними актами. Сумарний економічний ефект склав 1,654 млн. грн. на рік.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Терентьев О.М., Стовпник С.М., Гонтарь П.А., Клещев А.И. Резонансное энергоощадное руйнування гірських порід: монографія. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського. 2018. 161 с. (Особистий внесок – написано розділ 1).

*Наукові фахові видання України:*

2. Пирский А.А., Стовпник С.Н. Шахтные исследования пучения почвы в выработках Западного Донбасса. *Уголь Украины*. Київ. 1989, № 11. С. 2–3. (Особистий внесок – розроблена методика і виконані дослідження).

3. Полухин В.А., Радченко В.В., Стовпник С.Н., Федористова А.А. Металлическая рамная крепь для горных выработок и тоннелей. *Уголь Украины*. Київ. 2006, № 2. С.16–17. (Особистий внесок – запропонована конструкція).

4. Стовпник С.Н. Поэтапное возведение замкнутых крепей на шахтах Западного Донбасса. *Уголь Украины*. Київ. 2006, № 4. С.7–8.

5. Стовпник С.Н. Нагрузочный режим замкнутых крепей на шахтах Западного Донбасса. *Уголь Украины*. Київ. 2006, № 8. С.27–32.

6. Стовпник С.Н. Анкерное усиление крепей на шахтах Западного Донбасса. *Уголь Украины*. Київ. 2007, № 1. С. 14–17.

7. Стовпник С.Н. Создание армопородных конструкций вокруг выработок, поддерживаемых в неустойчивых породах. *Уголь Украины*. Київ. 2007, № 11. С. 12–16.

8. Зайченко С.В., Кравець В.Г., Стовпник С.М., Загоруйко Є.А. Дослідження ефективності роликового ущільнення при будівництві тунелю методом скінченних елементів. *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут» Серія «Гірництво»*. Київ. 2014, вип. 25. С. 76–82. (включено до наукометричної бази даних *Google Scholar*) (Особистий внесок – розробка методики моделювання).

9. Гайко Г.І., Кравець В.Г., Зайченко С.В., Стовпник С.М. Прогресивний спосіб анкер–бетонного кріплення капітальних виробок шахт і тунелів. *Розробка родовищ – 2015. Щоріч. наук.–техн. зб.* Дніпропетровськ. 2015. С. 307–

312. (включено до наукометричної бази даних *Google Scholar*) (Автором запропонована конструкція кріплення).

10. Зуєвська Н.В., Стовпник С.М., Осипов О.С. Використання сучасних методів закріплення приконтурного масиву підземних виробок у складних інженерно-геологічних умовах. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. Київ. 2017, №3. С.30–34. (включено до наукометричної бази даних *Google Scholar*). (Автором запропоновано оптимальне комбінування способів закріплення).

11. Стовпник С.М., Осипов О.С. Геомеханічне обґрунтування засобів забезпечення стійкості тектонічно порушеного масиву на період спорудження великогабаритного тунелю. *Вісник КНУ «Гірництво»*. Київ. 2017, №34. С.17–27. (Автором обґрунтовані засоби забезпечення стійкості).

12. Стовпник С.Н., Осипов А.С. Исследования флишевого породного массива в условиях строительства Бескидского тоннеля. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. Київ. 2018, №1. С.1–9. (включено до наукометричної бази даних *Google Scholar*). (Автором розроблена методика дослідження та проаналізовані результати).

13. Стовпник С.Н., Осипов А.С. Обоснование нового подхода в проектировании временной крепи для условий флишевого сложения геомассива при строительстве Бескидского тоннеля. *Гірничий вісник Науково-технічний збірник*. Кривий ріг. 2017, №102. С. 67–73. (включено до наукометричної бази даних *Google Scholar*, *Index Copernicus*, *Research Bible*, *Academic Keys* та ін., в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова»). (Автором обґрунтовані засоби забезпечення стійкості).

14. Стовпник С.Н., Зуєвська Н.В., Осипов А.С. Внедрение прогрессивной технологии сооружения Бескидского тоннеля горным способом в условиях флишевого сложения геомассива. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. Київ. 2019, №1. С.42–44. (включено до наукометричної бази даних *Google Scholar*). (Автором розроблені проектні положення технології спорудження).

*Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:*

15. Стовпник С.М. Ocena ekonomiczna wydajności konstrukcji podtrzymujących o ulepszonym układzie, stosowanych w przypadku niestabilnych skał w kopalniach w zachodnim Donbasie // *Inzynieria Gornicza, Elamet, Krakow*, 2016, №4. S. 28–29.

16. Stovpnik S. N. Features of post-limit deformation of rocks in the Donetsk coal basin / S.N. Stovpnik // *Journal of Mining Science*. New York: Springer. 2016, vol. 27, b. 41, p. 176–179.

17. Стовпник С.М., Осипов О.С., Имашев А.Ж. Опыт решения задач моделирования и расчета временной крепи подземной выработки в сложных инженерно-геологических условиях проходки на примере строительства Бескидского тоннеля. *Горный журнал Казахстана*. 2018, № 4. С.15–21. (Автором проведено узагальнення і аналіз результатів)

18. Zaichenko S., Frolov O., Stovpnyk, S., Veremiichuk Y. Investigation of the change in the strength properties of a soil mass by mechanical sensing. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, p. 19–26. (включено до наукометричної бази даних Scopus). (Особовий внесок – обробка і аналіз результатів досліджень).

19. Кириченко В.Я., Стовпник С.Н. Моделирование взаимодействия крепи и вмещающего массива для выработки глубокого заложения. *Розробка родовищ* 2018. Дніпро: Літограф. 2018, №1. С.19–27. (включено до наукометричної бази даних Web of Science Core Collection, WorldCat, ResearchBib) (Автором виконана постановка задач досліджень та аналіз результатів).

*Патенти на винахід (авторські свідоцтва про винахід):*

20. Способ охраны горной выработки в слоистом массиве Авт. свид. на винахід. 4209933/23–03 SU: МПК E21D 9/00. № 1459387; заявл. 16.03.1987; опубл. 15.10.1988. Бюл. № 33/1988.

21. Способ управления напряженным состоянием пород вокруг выработки: Авт. свид. на винахід. 4723756/03 SU: МПК E21C 41/16, E21C 39/00. № 1776792; заявл. 20.07.1989; опубл. 23.11.1992, Бюл. № 43/1992. (Особовий внесок – генерація та обґрунтування творчої ідеї винаходу).

22. Пристрій для зведення монолітного кріплення тунелю: пат. 119030 Україна: МПК E21D9/06, E21D 11/10. № 201502460; заявл. 19.03.2015; опубл. 25.04.2019. Бюл. № 8/2019 (Автором запропонована конструкція кріплення).

*Патент на корисну модель:*

23. Спосіб кріплення підземних виробок. пат. 128734 Україна: МПК E21D11/00, E21D 21/00. № 201802344; заявл. 07.03.2018; опубл. 10.10.2018. Бюл. № 19/2018.

*Публікації за матеріалами конференцій:*

24. Стовпник С.М. Геомоніторинг стану геотехнічно порушеного масиву на будівництві Бескідського тунелю. *Енергетика.Екологія.Людина* Збірн. наук. праць 10 міжнар. наук.–прак. конф. (Київ, НТУУ «КПІ» 31трав. 2016 р.). Київ, 2016. С. 28–38.

25. Стовпник С.М. Системна оцінка ефективності застосування замкнутих конструкцій рамного кріплення у нестійкому масиві. *Матеріали X наук.–прак. конф. «Школа підземної розробки»* (Бердянськ, 15–18 серп.2016 р.), Бердянськ, 2016. С.83–84.

26. Stovpnyk S. Improving mining preparatory works in conditions of maximum stress state array. "PRESENT AND FUTURE OF THE MINING AND GEOLOGICAL SURVEY" Mater. intern.scient.conf. Slovak rep. October,5–7, 2016, Low Tatry, p. 28–30.

27. Stovpnyk S. Economic assessment efficiency improved designs frame support in an unstable rocks in West Donbas mines. Mater. "Gornicze Forum Ekonomiczne", September,15, 2016, AGH, Krakow, Inzynieria Mineralna, №2, 2016, s. 247–248

28. S. Stovpnyk, O. Temchenko, ZHanna Breher. Formation of the system of implementation of the crisis management mechanism based on the example of mining enterprises. Proceedings of the International Scientific Conference. Volume VI, May

24th – 25th, 2019. Р. 500–509. (включено до наукометричної бази даних Web of Science) (Особовий внесок – розробка принципів і технології кризисного керування).

29. Стовпник С.М. Розвиток Західного Донбасу – перспектива вуглевидобувної галузі України. *«Школа підземної розробки»* Матеріали XI науково–практ. конф. (Бердянськ, 4 верес. 2017 р.), Бердянськ, 2017. С. 49–50.

30. Стовпник С.М., Пикало В.С. Розвантаження камуфлетним підриванням приконтурних порід на шахтах Західного Донбасу. *«Перспективи розвитку будівельних технологій»*. Матеріали 12 міжн. конф. 24 квіт. 2018 р., Дніпро, 2018. С. 95–98. (Автором виконані експериментальні дослідження і аналіз їх результатів).

31. Стовпник С.М., Колодій А.Г. Армування гірських масивів для підвищення стійкості гірничих виробок. *«Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів»*: Житомирський технолог. унів., 5 наук.–практ. студ. конф., м. Житомир, 18–19 квіт. 2018. С. 62–65. (Особовий внесок – розроблена технологія виконання робіт).

32. Стовпник С.М., Ган А.Л., Загоруйко Є.А. Обґрунтування умов взаємовпливаючого режиму роботи рамно–анкерної конструкції в системі «масив – кріплення». *«Школа підземної розробки»*: матеріали XII міжн. наук.–практ. конф. 4–8 вересня 2018, Бердянськ, НГУ. С. 81–82. (Автором теоретично обґрунтовано параметри роботи конструкції).

33. Стовпник С.М. Моніторинг геомеханічного стану тектонічно порушеного масиву на будівництві Бескидського тунелю. *«Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики»* II міжнар. наук.–техн. конф. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 7–12. (Автором виконано аналіз результатів).

34. Стовпник С.Н., Осипов О.С. Оптимизация комбинированной конструкции временной крепи тоннелей для сложных инженерно–геологических условий флишевого сложения массива. *Сборн. науч.тр. «Вести Донецкого горного института»* Восьм. науч.–практ. форум «Донбасс–2020: перспектива развития» 2016. С. 61–64. (Автором запропонована конструкція кріплення).

## АНОТАЦІЯ

**Стовпник С.М.** «Розвиток основ руйнівного деформування приконтурних порід слабометаморфізованого масиву дією геотехнічних збурень». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – геотехнічна і гірнича механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково–практичної проблеми розвитку основ руйнівного деформування приконтурних порід слабометаморфізованого масиву дією геотехнічних збурень, яка спирається на розробку заходів забезпечення рівноваженого стану гірського масиву.

В роботі визначено розподіл енерговиділення гірського масиву навколо виробки і визначена доля енергії, яка викликає неврівноважений стан масиву, який регулюється енергоємністю руйнування порід.

Вперше встановлено і експериментально підтверджено коливальний перерозподіл напружень стискання та розтягнення, які визначають розвиток руйнування навколо виробки. Розроблено технологічні рішення і технічні засоби, що забезпечують експлуатаційну стійкість гірничих виробок. Розроблені технологічні схеми поетапного проведення виробок.

**Ключові слова:** гірничі виробки, слабометаморфізований масив, руйнування гірських порід, геотехнічні збурення, конструкція кріплення.

## ABSTRACT

**Stovpnyk S.M.** "Development of bases of destructive deformation of contour rocks of weakly metamorphosed massif by action of geotechnical disturbances"—Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

This is for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.15.09 – Geotechnical and Mining Engineering. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» of the Ministry of education and science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific and practical problem of development of bases of destructive deformation of contour rocks of the weakly metamorphosed massif by action of geotechnical disturbances which is based on development of measures of maintenance of a balanced condition of a mountain massif.

The distribution of energy release of the rock mass around the mine is determined in the work and the share of energy that causes the unbalanced state of the massif, which can be regulated by the energy intensity of rock destruction, is determined.

For the first time, the self-oscillating redistribution of compressive and tensile stresses, which determine the development of fracture around the workpiece, was established and experimentally confirmed. Technological solutions and technical means have been developed to ensure the operational stability of mine workings. Technological schemes of step-by-step carrying out of workings are developed.

Scientific novelty:

The energy component of the unbalanced state of an extremely tense massif is substantiated and analytically determined, the realization of which in the form of physical deformations and destruction of rocks causes damped oscillations of the synenergetic process of achieving equilibrium of the massif disturbed by production.

The achievement of the minimum level of energy state of the array as an equilibrium condition of the contour array around the zone of destroyed rocks in the form of an asymmetric ellipse with an equivalent ratio of the lengths of the ellipse diagonals to the physical anisotropy of rocks.

For the analytical model of asymptotic occurrence of fracture zones around workings in the form of harmonic oscillations of mutual redistribution of concentration

of normal compressive stresses and tangential tensile stresses in the surrounding array is proposed.

For the phenomenon of compressibility of collapsed rocks was recorded by instrumental methods and the effect of restoring the bearing capacity of destroyed rocks by the action of rock pressure loads was proved.

The physical conditions of formation of different shapes of rock blocks in lateral pillars of development as exponential dependence of the angle of inclination of the main crack during rock destruction by compression on load intensity, which is proportional to the rate of roof stratification, were determined and experimentally confirmed.

The hydrostatic state of an array of weakly metamorphosed rocks was experimentally proved by side-gap tests on the effect of "memory" of rocks.

The polynomial dependences of indicators of development of a zone of the destroyed breeds around working out by action of geotechnical disturbances are received: at carrying out of parallel working out, influence of mining works, performance of repair work. The dependence of the stable state of the shape of the zone of destroyed rocks in the form of an asymmetric ellipse on the strength of rocks was determined.

The conditions of formation of rock blocks of different shapes in the sides of the workings and their compliance with the process of deformation of rocks around the workings are determined. The dependence of indicators of compressibility and bearing capacity of rock mass of destroyed rocks under the action of rock pressure loads is established.

The dependence of dynamics of development of a zone of the destroyed breeds around working by action of geotechnical disturbances is carried out: carrying out of parallel workings, influence of extractive works, performance of repair work, etc. The dynamics of attenuation of reference pressure after lava stop is established.

The conditions for the creation of the system "Fastening – a layer of reinforced rock-array", which provides a mode of increasing resistance.

The indicators of regulation of bearing capacity of fastening from the mode of manifestations of rock pressure are determined. The dependence of intensity of deformation process around working on the moment of creation of the closed design of fastening is established. The possibility of restoring the bearing capacity of rock mass by clogging of clay rocks was determined.

The conditions for stopping the process of deformation of rocks around the workings by pinching the fastening structure are determined

The practical results of the work are as follows: developed and industrially tested fastening system "closed fastening – layer of reinforced rocks – array", which provides the balance of the array of weakly metamorphosed rocks in the elastic support mode, developed technology for phased construction of workings based on deformation intensity creation of a closed fastening structure, developed technology of restoration of workings section by clamping of fastening structure as conditions to prevent intensification of rock deformation process around workings, production process of main workings maintenance at Zakhidno-Donbaska mine document "Guide to the

protection of mining in the mines of Western Donbass" (VNIMI), introduced a combined annular structure of I-beams and anchor reinforcement during the construction of Beskid tunnel.

The difference between research and known solutions is to develop a design of annular fastening of I-beam profile, which provides joint deformation around the contour rocks in the mode of "permanent elastic support", to develop a method for determining the density of anchor reinforcement rocks in mine conditions according to geological exploration works depending on the stress state of the massif, development of technology of step-by-step workings by combine method depending on intensity of deformation process in the surrounding massif, development of control system of stability of system of mine workings under the influence of geotechnical disturbances.

**Keywords:** mining, weakly metamorphosed massif, destruction of rocks, geotechnical disturbances, fastening design.





**Стовпник Станіслав Миколайович**

**РОЗВИТОК ОСНОВ РУЙНІВНОГО ДЕФОРМУВАННЯ  
ПРИКОНТУРНИХ ПОРІД СЛАБОМЕТАМОРФІЗОВАНОГО МАСИВУ  
ДІЄЮ ГЕОТЕХНІЧНИХ ЗБУРЕНЬ**

Спеціальність 05.15.09 – Геотехнічна і гірнича механіка

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук